АРИДНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ, 2019, том 25, № 4 (81), с. 3-15

СИСТЕМНОЕ ИЗУЧЕНИЕ АРИДНЫХ ТЕРРИТОРИЙ

УДК 551.573

ХАРАКТЕРИСТИКА ИЗМЕНЧИВОСТИ ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ ЛЕСНЫХ И ЛУГОВЫХ ЭКОСИСТЕМ АРИДНОГО РЕГИОНА ЦЕНТРАЛЬНОГО И ЮЖНОГО НИНСЯ[1]

© 2019 г. Ц. Ли*, **

*****Школа гражданского и гидротехнического строительства Университета Нинся*
Китай, 750021, Иньчуань, Нинся, ул. Вэньцуй Н., Сисиа Цюй, Иньчуань Ши

******Центр технических исследований эффективного использования водных ресурсов в современной агрикультуре аридных регионов*
Китай, 750021, Иньчуань, Нинся. E-mail: lijinyan001@163.com

Поступила в редакцию 20.09.2018. После доработки 12.12.2019. Принята к публикации 07.05.2019.

Состояние и развитие растительного покрова является важным критерием при улучшении экологической среды аридных регионов, поэтому изучение экологического водопотребления растительности стало злободневной проблемой в области экологии и гидрологии. В данном исследовании затронуто 8 округов в центральной и южной частях провинции Нинся, которые расположены с севера на юг в аридном регионе на северо-западе Китая. Цель работы – оценить потенциальное испарение и экологическое водопотребление местной растительности на основе метеорологических данных, данных о распространении растительности, данных о состоянии водных ресурсов и т.д. Данная работа может помочь нам понять и усвоить закономерности пространственно-временного распределения экологического водопотребления и обеспечить основу для планирования и культивации лесо-луговой растительности региона. Во-первых, для расчета экологического водопотребления были использованы модели Торнтвэйта и Пенмана-Монтейта. Сравнение результатов расчетов показало, что данные, полученные по модели Пенмана-Монтейта, более приемлемые, поскольку в модели используются ряд метеорологических величин и факторы географического положения. Вместе с тем при расчете экологического водопотребления были использованы формула Дженсена и региональная кривая почвенных характеристик для определения поправочного коэффициента влажности почвы. Во-вторых, месяц за месяцем оценивалось потенциальное испарение и экологическое водопотребление местной растительности при использовании осадков. На этой основе были проанализированы пространственная и временная изменчивость значений потенциального. Результаты показали, что потенциальное испарение имеет тенденцию увеличения от месяца к месяцу с января по июль, и снижения с августа по декабрь. Что касается пространственного распределения, потенциальное испарение постепенно увеличивается с юга на север. Была проанализирована пространственная изменчивость баланса между осадками и экологическим водопотреблением растительности; результаты показали, что экологические запасы воды в центральном регионе более существенны, чем в южном, самые большие запасы воды отмечены в Яньчи – самом северном округе центрального аридного региона. И, напротив, экологическое водопотребление в лесах было избыточным на протяжении всего вегетационного периода в самом южном округе Цзинъюань. Кроме того обсуждается пространственная и временная изменчивость соотношения между зависимым от осадков экологическим водопотреблением и водными ресурсами. Результаты показали, что еще есть достаточно места для регионального распространения растительности в Яньчи, Тунсинь и Хайюань в центральном аридном регионе и относительно сухих округах, таких как Юаньчжоу, Сицзи и Пэнъян в южной горной местности, и больше площадей для увеличения растительного покрова отмечается в округах Лундэ и Цзинъюань, расположенных на юге горной местности где относительно много осадков.

[1] Работа выполнена при финансовой поддержке Национального научного фонда Китая (National Natural Science Foundation of China, 51569024) и Крупных инновационных проектов для строительства университетов первого класса (Major Innovation Projects for Building First-class University) в западном регионе Китая (ZKZD2017002).

Ключевые слова: экологическое водопотребление, водные ресурсы, осадки, леса, луга, центральный и южный Нинся.
DOI: 10.24411/1993-3916-2019-10069

Аридный регион западного Китая, где экология весьма уязвима, является ключевой точкой для экологического проектирования. Зависимость между формированием водных ресурсов и экологическим проектированием напрямую влияет на устойчивое развитие местной социальной экономики. К тому же система водных ресурсов – это крупномасштабная комплексная система, которая взаимодействует с экологической средой, экономикой и обществом. Экологическое водопотребление должно рассматриваться в контексте устойчивого развития и использования водных ресурсов, чтобы развитие и использование водных ресурсов не только удовлетворяло водопотребление в экономическом и социальном развитии, но также гарантировало безопасность и безопасное развитие всей системы экологической среды. Поэтому исследование экологического водопотребления, особенно в аридном регионе западного Китая, необходимы как для защиты окружающей среды, которая еще не подверглась разрушению, так и для разработки экологических и природоохранных мер по восстановлению водосборных бассейнов. Определение экологического водопотребления всегда было ключевой основой для принятия ряда важных решений, касающихся водных ресурсов Китая. Рациональное развитие лесов и лугов стало важной мерой для администрирования экологической среды аридных регионов. Таким образом, исследование экологического водопотребления растительности привлекает все больше и больше внимания (Shen, 2001; Yang et al., 2003; Deng, 2009).

Физико-географическая среда автономного округа Нинся, расположенного в аридном регионе на северо-западе Китая, имеет ярко выраженную зональность, поэтому округ можно разделить на 3 географических единицы по количеству осадков и региональным геоморфологическим параметрам: орошаемый северный район реки Хуанхэ, где среднегодовое количество осадков менее 200 мм; центральный аридный район, где среднегодовое количество осадков составляет 200-350 мм; и южный горный район, где среднегодовое количество осадков более 350 мм. Центральный и южный районы – это область самого серьезного дефицита воды в Нинся. Долговременный дефицит воды – препятствие для экономического и социального развития региона, и сфера его влияния постоянно распространяется от традиционного сельского хозяйства до экологии и окружающей среды, в результате чего возникает нехватка питьевой воды для городских и сельских жителей по всему региону, происходит исчезновение оазисов, рек, опустынивание земель и возникают другие проблемы. Учитывая это, данная работа посвящена изучению экологического водопотребления растительности лесов и лугов в аридном регионе центрального и южного Нинся, который включает в себя округи Яньчи, Тунсинь, Хайюань, Юаньчжоу, Сицзи, Пэнъян, Лундэ и Цзинъюань, простирающиеся с севера на юг. Работа основана на данных о распространении растительности лесов и лугов, на метеорологических данных и информации о состоянии водных ресурсов и направлена на то, чтобы лучше понять и осознать характеристики пространственного и временного распределения экологического водопотребления в надежде на то, что удастся создать основу для планирования и создания лесных и луговых экосистем в регионе.

Методы исследований

Классификация растительности лесов и лугов и их экологическое водопотребление. На карте распределения землепользования лесные угодья разделены на четыре категории: лес, редкий лес, кустарник и облесенные земли. Под лесом подразумеваются естественные леса и лесопосадки с плотностью покрытия больше 30%. Редкий лес – это лес с плотностью покрытия от 10% до 30%. Кустарники – это подлесок и кустарник с плотностью покрытия более 30% и высотой менее 2 метров. Луга поделены на следующие категории: естественные луга, многолетние и однолетние искусственно созданные луга. Учитывая, что в структуре и во внешнем виде сообществ наблюдаются большие различия между категориями лесов и лугов, из-за чего в водопотреблении этих экосистем неизбежно возникают различия на микро- и макро- уровне, необходимо сначала провести классификацию, и только потом оценивать и анализировать их экологическое водопотребление (Yang et al., 2003; Deng, 2009; Gao, 2008). В данной работе лесные и луговые экосистемы, а также их категории были

получены из “Statistics of Areas and Structures of Forestlands and Grasslands in Counties of Ningxia Hui Autonomous Region” (Statistics of Areas …, 2014). Кроме того, для проведения анализа баланса экологического водопотребления в целях распределения и планирования региональных водных ресурсов, экологическое водопотребление было разделено по источнику его формирования – осадки или сток. Естественная растительность для удовлетворения своих экологических потребностей в воде зависит в основном от осадков, то есть имеет место атмосферное питание экологического водопотребления. Кроме того, за счет атмосферного питания удовлетворяется потребность в воде некоторых лесных угодий, включая лес, редколесье, кустарник и другие лесные угодья (нетронутые земли и облесенные земли), а также некоторые луга, в том числе естественные луга и многолетние искусственно созданные луга. Экологическое водопотребление, в основе которого лежит сток, напрямую связано с распределением и регулированием водных ресурсов. Эти водные ресурсы могут рассматриваться в качестве переменных или ограничивающих условий в моделях распределения водных ресурсов. На основе использования стока формируется экологическое водопотребление питомников леса и однолетних искусственно созданных лугов.

В этой работе исследуется пространственно-временная изменчивость экологического водопотребления лесной и луговой растительности и водный баланс между экологическим водопотреблением, осадками и региональными водными ресурсами. Учитывая, что данные по экологическому водопотреблению естественной растительности могут быть использованы в качестве основы для экологического строительства, распределения растительного покрова, управления водными ресурсами, в основном изучалась изменчивость осадков и экологического водопотребления лесной и луговой растительности(Shen, 2001; Yang et al., 2003; Deng, 2009; Gao, 2008).

Определение и оценка экологического водопотребления лесной и луговой растительности. Многочисленные исследования показали, что определение суммарного испарения растительности является ключом к изучению экологического водопотребления. Определение суммарного испарения чрезвычайно сложно, поскольку оно зависит от многих факторов, таких как физиология растений, биометрические параметры и климатические характеристики. Существует три разновидности выражения испарения, а именно потенциальное испарение, максимальное суммарное испарение и фактическое суммарное испарение. Потенциальное испарение это максимально возможное испарение растительности при оптимальной влажности почвы и зависит только от региональных метеорологических факторов. Максимальное суммарное испарение это испарение растительности при оптимальной влажности почвы, которая (растительность) в полной мере использовала свой потенциал роста. Величина максимального суммарного испарения зависит как от состояния растений так и от метеорологических факторов. Фактическое суммарное испарение – это испарение растительности, растущей в условиях фактической влажности почвы; величина фактического суммарного испарения определяется состоянием растений, метеорологическими условиями и влажностью почвы (Gao, 2008). Из анализа приведенной выше информации следует, что суммарное испарение в засушливых или полузасушливых регионах, где почва, как правило, испытывает недостаток воды из-за ограниченного количества осадков, является фактическим суммарным испарением и при выполнении дальнейших исследований может рассматриваться как экологическая квота водопотребления растительности.

Оценка потенциального испарения. В настоящее время методы для расчета потенциального испарения в основном включают в себя методы Торнтвэйта и Пенмана-Монтейта. Эти два метода широко используются при расчете потенциального испарения на лесных территориях аридных регионов. Тем не менее, исследований по сравнению результатов двух методов для выяснения их пригодности для использования в разных регионах мало. В настоящей работе для выбора наиболее приемлемого метода расчета потенциальное испарение в регионе было рассчитано с использованием как метода Торнтвэйта так и метода Пенмана-Монтейта. Из соображений простоты сравнительный анализ результатов оценки потенциального испарения выполнен для четырех округов: Юаньчжоу, Сицзи, Пэнъян и Хайюань.

Модель Торнтвэйта. Метод Торнтвэйта был разработан для расчета потенциального испарения в засушливых регионах центральной части Соединенных Штатов. Этот метод прост для использования и требует только многолетних данных о средней температуре воздуха в исследуемом регионе. Данный метод был использован при расчете потенциального испарения, а также экологического

водопотребления леса во многих аридных и семиаридных регионах Китая. Модель записывается в виде (Deng, 2009; Gao, 2008):

$$ET_0 = k16.2(10T/H)^A, \quad (1)$$

$$H = \sum_{n=1}^{12} h, \quad h = (\frac{T}{5.0})^{1.514}, \quad A = 6.75\times10^{-7}H^3 - 7.71\times10^{-5}H^2 + 1.79\times10^{-2}H + 0.49, \quad (2)$$

где ET_0 – потенциальное испарение в регионе за месяц, мм; H — тепловой индекс за год; h – тепловой индекс за месяц (при $T \leq 0$°C, h=0); T – средняя месячная температура воздуха, A – нелинейная функция годового индекса тепла; k – поправочный коэффициент, определяемый по специальной таблице в зависимости от широты.

Оценка потенциального испарения в исследуемом регионе по методу Торнтвэйта была выполнена на основе данных о температуре воздуха. Как показывает анализ, температура почвы в январе, феврале и декабре во всех округах исследуемой территории опускается ниже 0 С, почва промерзает, и жизненная активность деревьев прекращается. В этот время транспирация отсутствует, поэтому расчеты экологического водопотребления лесных экосистем в данном исследовании выполнены за период с марта по ноябрь.

Модель Пенмана-Монтейта. Потенциальное испарение, оцененное с использованием модели Пенмана-Монтейта (Hu et al., 2005), в основном показывает влияние климата на водопотребление растительности. В соответствии с пересмотром требований к воде для эталонных культур в 1992 году, такие организации, как Организация по продовольствию и сельскому хозяйству ООН (FAO) и Международная комиссия по ирригации и дренажу (ICID), рекомендуют метод Пенмана-Монтейта для расчета водопотребления эталонных культур. Модель выражается как:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma\frac{900}{T+273}u_2 VPD}{\Delta + \gamma(1+0.34u_2)}, \quad (3)$$

где ET_0 – потенциальное испарение, мм/сут; Δ – производная насыщающей упругости водяного пара от температуры воздуха, кПа/°C; R_n – радиационный баланс, мДж/м^2 в сутки; G – теплообмен в почву, мДж/м^2 в сутки; γ – психрометрическая константа, кПа/°C; T – средняя суточная температура воздуха, °C; u_2 – средняя суточная скорость ветра на высоте 2 м, м/сек; VPD – дефицит влажности воздуха на высоте 2 метра, кПа; $VPD=e_a-e_d$, где e_a и e_d – насыщающая и фактическая упругость водяного пара соответственно, кПа.

При расчете потенциального испарение по модели Пенмана-Монтейта была с использована «Система управления информацией для оценки и анализа коэффициентов эффективности использования воды для местного орошения» (Information Management System for Estimation and Analysis of Effective Utilization Coefficients of Provincial Irrigation Water), разработанная Институтом исследований водных ресурсов и гидроэнергетики Китая. Эта система управления, разработанная на базе модели Пенмана-Монтейта, может использоваться для расчета декадного, месячного или годового потенциального испарения в регионе ET_0 на основе информации о географическом положении региона или водосборного бассейна (долгота, широта и высота), среднегодовых осадках, суточной минимальной и максимальной температуре воздуха, продолжительности солнечного сияния, среднесуточной относительной влажности воздуха, скорости ветра на высоте 2 м, суточных осадках и других гидрологических и метеорологических данных. При рассмотрении потенциального испарения, рассчитанного по моделям Торнтвэйта и Пенмана-Монтейта, во внимание принимались данные за период с марта по ноябрь.

Сравнение и анализ потенциального испарения. Как видно из рисунка 1, тенденция изменений значений потенциального испарения, рассчитанных двумя упомянутыми методами, в основном одинакова, за исключением округа Пэнъян; последовательность от малого к большему следующая: Сицзи, Юаньчжоу, Хайюань. Это указывает на то, что обе группы результатов имеют некоторую обоснованность. Тем не менее, эти группы величин заметно различаются. Значения, полученные с использованием метода Пенмана-Монтейта, намного больше, чем значения, полученные с использованием метода Торнтвэйта. На рисунке 1 также видно, что данные, полученные с использованием метода Торнтвэйта, не обнаруживают существенных различий между округами, в то время как результаты, полученные с использованием метода Пенмана-Монтейта, указывают на

ощутимые различия. Основная причина заключается в том, что модель Пенмана-Монтейта учитывает множество метеорологических факторов и факторов географического положения, в то время как метод Торнтвэйта учитывает только влияние температуры и поэтому не позволяет выявить очевидные пространственные и временные различия. Между тем, и результаты, полученные Q. Min и Y. Geng (2005) из Шаньдунского педагогического университета при исследовании экологического водопотребления растительности в бассейне реки Цзинхэ, ближе к результатам, полученным при использованием метода Пенмана-Монтейта. Следовательно, данные, полученные по методу Пенмана-Монтейта, более достоверны и надежны, поэтому и были использованы в настоящем исследовании.

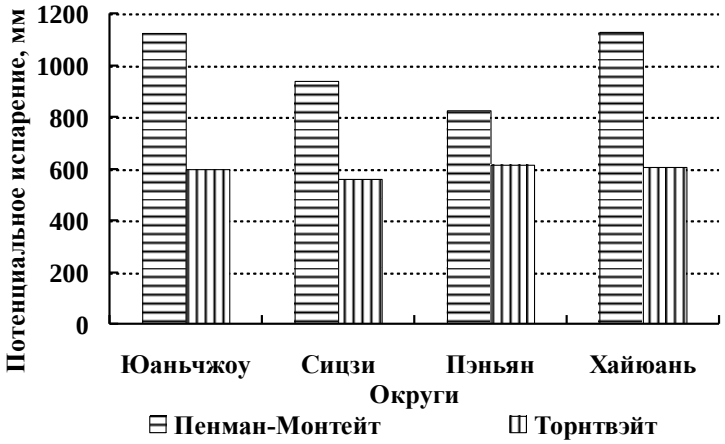

Рис. 1. Потенциальное испарение, полученное по моделям Пенмана-Монтейта и Торнтвэйта.

Оценка экологического водопотребления растительности. Расчет фактического суммарного испарения для различных видов лесной и луговой растительности (экологическое водопотребление) выполнен на основе оценки потенциального испарения лесных и луговых экосистем (ET_0) по зависимости:

$$ET_{Ci}=ET_0K_cK_s \quad (4),$$

где ET_{Ci} – фактическое экологическое водопотребление растительности (i), мм; ET_0 – потенциальное испарение, мм; K_c – коэффициент водопотребления растительности (i); K_s – поправочный коэффициент на влажность почвы в изучаемом регионе. Из приведенного уравнения видно, что при определении фактического водопотребления на основе оценки потенциального испарения ключевыми факторами являются определение коэффициента водопотребления и поправочного коэффициента на влажность почвы (Jia, Ci, 2000).

Определение коэффициента водопотребления растительности. B. Chu и S. Shang (2009) из Государственной лаборатории гидротехники и проектирования Университета Цинхуа было проведено экспериментальное изучение экологического водопотребления лесной и луговой растительности в аридных и семиаридных регионах. Результаты показали, что коэффициент экологического водопотребления леса равен 0.757, кустарников – 0.612, лугов – 0.661; коэффициент водопотребления кустарников и лугов составляет 0.81 и 0.85 от коэффициента водопотребления леса соответственно. He Y. с соавторами (2004) изучали коэффициенты водопотребления лесной растительности на Лёссовом плато на примере робинии *Robinia pseudoacacia* и сосны *Pinus tabulaeformis,* типичных для плато видах лесной растительности. Они определили, что коэффициент водопотребления леса равен 0.765, и на основе многолетних сравнительных экспериментов полагают, что коэффициент водопотребления кустарников составляет примерно 0.8 от коэффициента водопотребления леса. Результаты вышеупомянутых исследований показывают, что коэффициенты водопотребления растительности в аридных и семиаридных регионах близки. В настоящем исследовании коэффициент водопотребления леса принят равным 0.765; коэффициент водопотребления кустарников – 0.612, лугов – 0.650, что составляет 0.80 и 0.85 от коэффициента водопотребления леса.

Определение поправочного коэффициента на влажность почвы. Поправочный коэффициент на влажность почвы является функцией влияния влажности почвы на фактическое испарение лесных угодий с различными типами почв в условиях недостаточного увлажнения почвы. Значение этого

коэффициента зависит от гидрофизических свойств почвы и ее влажности и определяется по формуле Дженсена (Chu, Shang, 2009):

$$K_s = \ln[(\frac{W - W_f}{W_C - W_f} \times 100) + 1] / \ln 101, \quad (5)$$

где W – фактическая влажность почвы; W_f – влажность устойчивого завядания; W_c – критическая влажность почвы.

Согласно уравнению (5) поправочный коэффициент влажности почвы K_s может быть определен по фактической влажности почвы на каждой стадии развития растений с учетом гидрофизических свойств почвы. Затем этот коэффициент вместе с коэффициентом водопотребления и потенциальным испарением можно использовать для расчета экологического водопотребления растений по зависимости (4).

В холмистой местности Лессового плато связь между влажностью почвы и развитием деревьев является одним из главных вопросов в области экологии, и в этой области было получено много данных. M. Wang и H. Li (1995) изучали водный потенциал почвы и развитие деревьев *Robinia pseudoacacia* на Лёссовом плато в западном Шаньси, и результаты показали: влажность почвы при значении водного потенциала почвы -15×10^5 Па является влажностью устойчивого завядания (W_f) растительности; когда значение водного потенциала почвы равно -0.3×10^5 Па, то в этом случае можно говорить о ключевой точке в динамике влажности почвы лесных экосистем. Таким образом, влажность почвы при значении водного потенциала -0.3×10^5 Па обычно рассматривается как критическая влажность почвы (W_c) для растительности Лессового плато. Кроме того, исследования показали, что при уровне водного потенциала ниже -10×10^5 Па отмечается влажность временного завядания растительности в холмистой местности Лессового плато. Следовательно, при значении водного потенциала, равном в исследуемом регионе-10×10^5 Па, влажность почвы является влажностью временного завядания (W_t), что соответствует принятому значению поправочного коэффициента на влажность почвы. Другие исследования показали, что влажность почвы при водном потенциале равном -1×10^5 Па является минимальной влажностью почвы для обеспечения нормального роста растительности в холмистой области Лёссовом плато и называется влажностью замедления развития растительного покрова (Wr), соответствующей минимальному значению поправочного коэффициента на влажность почвы. Основываясь на приведенных выше результатах, в настоящей работе для иллюстрации расчета поправочного коэффициента на влажность почвы в качестве примера (рис. 2) показана типичная кривая измеренной влажности почвы в округе Яньчи.

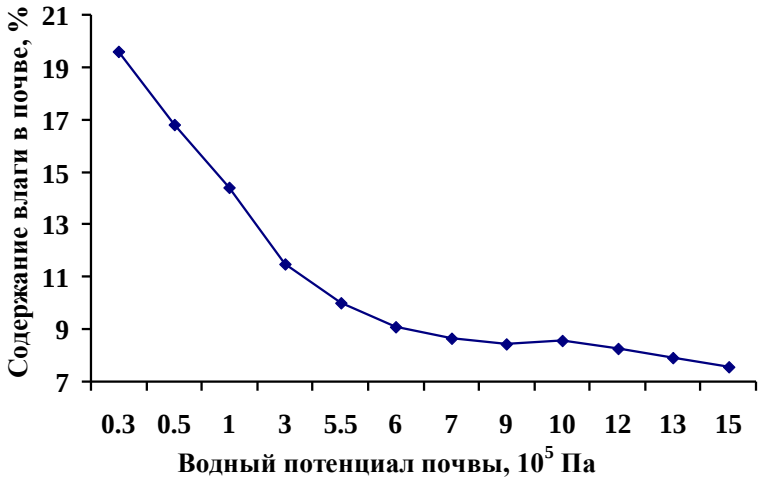

Рис. 2. Зависимость между содержанием влаги в почве и ее водным потенциалом в холмистой местности Лессового плато.

По графику (рис. 2) были получены характеристики влажности почвы при различных значениях водного потенциала в округе Яньчи (табл. 1); после чего по зависимости (5) были рассчитаны поправочные коэффициенты на влажность почвы (табл. 2).

Аналогичным образом были определены поправочные коэффициенты на влажность почвы для других округов.

Таблица 1. Влажность и водный потенциал почвы в холмистой местности Лессового плато.

Гидрофизические характеристики почвы	W_f	W_t	W_r	W_c
Влажность почвы, %	7.58	8.56	14.4	18.16
Водный потенциал почвы, 10^5 Па	-15	-10	-1.0	-0.3

Примечание к таблице 1. Wf – влажность устойчивого завядания, Wt – влажность временного завядания, Wr – влажность замедления развития растительного покрова, Wc – критическая влажность почвы.

Таблица 2. Поправочные коэффициенты на влажность почвы при влажности временного завядания K_{st} и влажности замедленного развития растительного покрова K_{sr} в холмистой местности Лессового плато.

K_{st}	K_{sr}
0.48	0.87

После определения поправочных коэффициентов с помощью формулы (4) можно рассчитать достаточное и минимальное экологическое водопотребление различных типов лесной и луговой растительности. Соответствующее экологическое водопотребление в единицах объема рассчитывается по формуле:

$$E_i=ET_{Ci}A_i, \quad (6)$$

где E_i – водопотребление данного типа растительности (i) за расчетный период, 10^4 м^3; ET_{Ci} – фактическое водопотребление данного типа растительности (i) за расчетный период, мм; A_i – площадь произрастания, км^2.

Результаты и обсуждение

Характеристика временной и пространственной изменчивости потенциального испарения. Как видно из рисунка 3, внутригодовое распределение потенциального испарения по 8 округам находится в соответствии друг с другом. Потенциальное испарение увеличивалось из месяца в месяц с января по июль и снижалось с августа по декабрь. Его значение достигло максимума в июне-июле, когда было выше 100 мм/месяц, а минимум наблюдался в декабре-январе. В январе и феврале значение ET_0 медленно росло, а в марте и апреле его рост стал сравнительно быстрым и соответствовал быстрому росту температуры воздуха, что привело к росту испарения весной в Нинся. С мая по июль значение ET_0 было сравнительно высоким и составляло более 40% от общего годового значения. Это главным образом вызвано меньшим количеством осадков и большей продолжительностью и интенсивностью солнечного сияния в аридном регионе центрального и южного Нинся за вышеупомянутые месяцы. В сентябре значения ET_0 были значительно ниже, чем в июне-июле, а также ниже, чем в апреле, что соответствовало низким температурам воздуха, которые отмечаются в Нинся осенью, и тому, что осенние температуры воздуха ниже весенних. В пространственном распределении потенциального испарения прослеживается географическая зональность: значения ET_0 постепенно уменьшаются с севера на юг по округам Тунсинь, Хайюань, Юаньчжоу, Яньчи, Сицзи, Пэнъян, Цзинъюань и Лундэ.

Характеристика изменений баланса между водопотреблением и осадками. Экологическое водопотребление растительности лесов и лугов может быть удовлетворено за счет атмосферных осадков. Однако из-за временной и пространственной неоднородности в выпадении осадков экологическое водопотребление некоторых видов растительности не будет обеспечено, что в определенной степени ограничит ее развитие. Часть экологического водопотребления, которое не может быть удовлетворено, называется дефицитом экологического водопотребления. В некоторые месяцы естественные осадки могут быть больше, чем экологическое водопотребление растительности, это называется избытком экологического водопотребления. В зависимости от ситуации с экологическим водопотреблением в аридных регионах при обсуждении проблем недостатка или избытка воды необходимы два параметра, а именно: минимальное водопотребление и достаточное водопотребление. Формула для расчета имеет вид:

$$H_i=A_i(E_{ci}-R_i), \quad (7)$$

где H_i – дефицит или избыток экологического водопотребления данной растительности (i), 10^4 м^3; A_i – площадь произрастания, км^2; E_{ci} – минимальное водопотребление данной растительности (i) в вегетационный период, мм; R_i – количество осадков, необходимое растительности (i) в вегетационный период, мм.

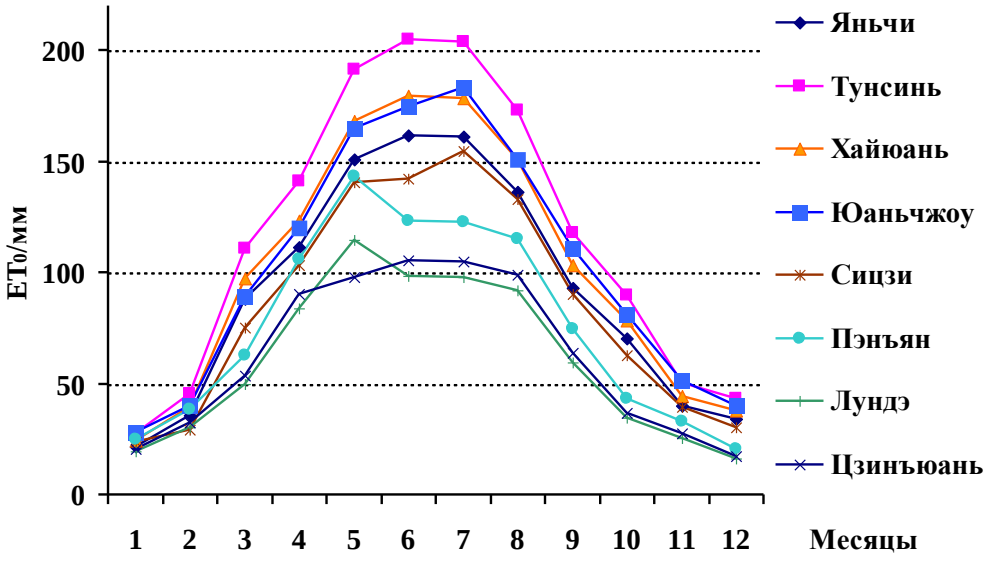

Рис. 3. Временная и пространственная изменчивость потенциального испарения.

Анализ баланса между экологическим водопотреблением, обеспечиваемым естественными осадками, и ресурсами осадков. В соответствии с фактическим экологическим водопотреблением и его распределением в исследуемом районе, были рассмотрены две ситуации для обсуждения проблемы нехватки воды, а именно: различия между минимальным экологическим водопотреблением и ресурсами осадков и между достаточным экологическим водопотреблением и ресурсами осадков. На рисунке 4 показан баланс между ресурсами осадков и экологическим водопотреблением в лесных экосистемах, обеспечиваемых естественными осадками. Из рисунка следуют три положения. 1) Минимальное и достаточное экологическое водопотребление для всех типов лесных территорий в округе Цзинъюань и округе Лундэ, расположенных в южных горных районах со среднегодовым количеством осадков 350-550 мм, может быть удовлетворено за счет естественных осадков. Избыток минимального экологического водопотребления в двух округах составил 5.83×10^7 м^3 и 8.25×10^7 м^3 соответственно; избыток достаточного экологического водопотребления составил 132.12×10^4 м^3 и 51.53×10^4 м^3 соответственно. Лесная растительность в этом регионе была в хорошем состоянии. 2) Минимальное экологическое водопотребление для всех типов лесных угодий в округе Пэнъян и районе Юаньчжоу, расположенных в южных горных районах со среднегодовым количеством осадков около 350 мм, может быть удовлетворено за счет естественных осадков, в то время как достаточное экологическое водопотребление не может быть реализовано в обоих местах. Дефицит осадков, удовлетворяющих достаточное экологическое водопотребление в данном случае составляет 1.01×10^8 м^3 и 4.21×10^7 м^3 соответственно. 3) Минимальное и достаточное экологическое водопотребление для всех типов лесных экосистем в Хайюань, Тунсинь и Яньчи, расположенных в центральном аридном регионе, и в Сицзи, расположенном в южном горном районе, не может быть обеспечено естественными осадками при их среднегодовом количестве 175-280 мм.

На рисунке 5 показан баланс между экологическим водопотреблением луговых экосистем, обеспечиваемый естественными осадками, и ресурсами осадков. При сравнении рисунков 4 и 5 можно заметить, что водный баланс луговых экосистем имеет то же распределение, что и в лесных экосистемах. Таким образом, в современных климатических условиях экологическое водопотребление, обеспечиваемое естественными осадками, в округах Хайюань, Тунсинь и Яньчи в центральной аридной зоне, а также в округе Сицзи в южном горном районе находится в дефиците,

поэтому широкомасштабная культивация растительности в этих округах проводиться не должна. Следовательно, облесение должно проводиться на низких и плоских участках, обеспеченных запасами фреатических вод, а древесные виды должны быть устойчивы к засухе и засолению. Обоснованная структура высадки растений также должна проектироваться в южных горных районах Юаньчжоу и Пэньян.

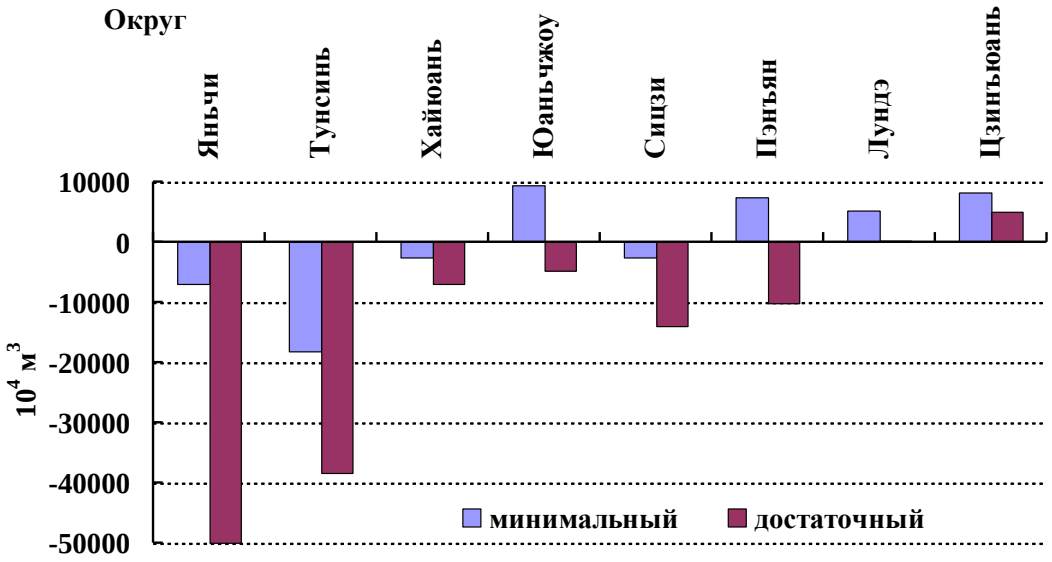

Рис. 4. Баланс между экологическим водопотреблением лесных экосистем, обеспечиваемый естественными осадками, и ресурсами осадков.

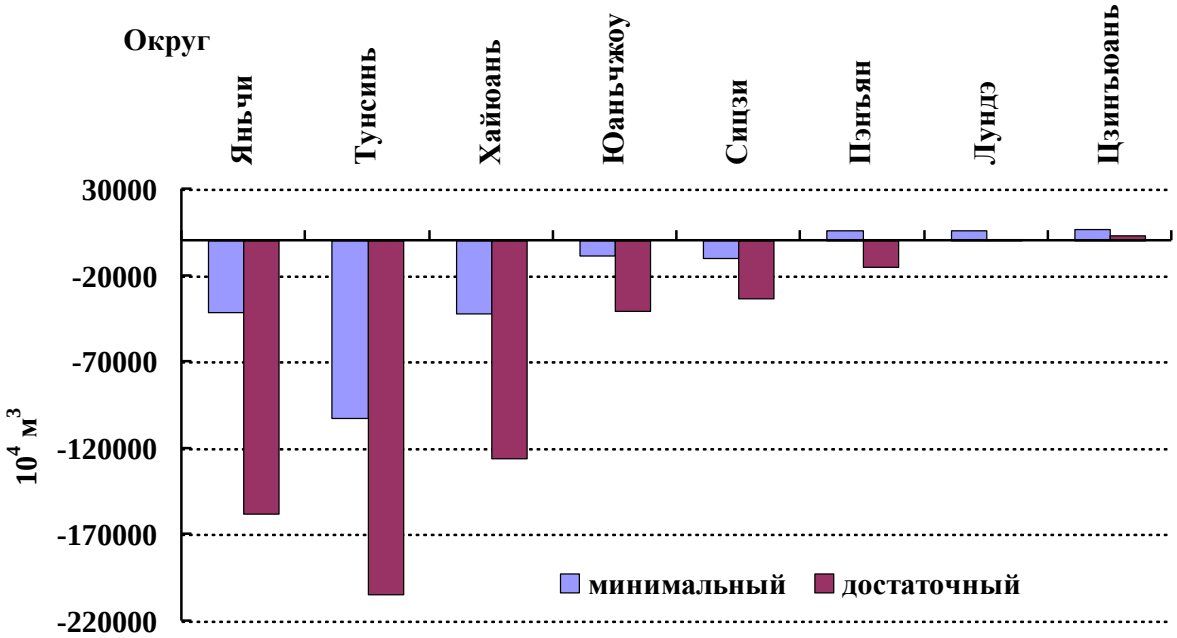

Рис. 5. Баланс между экологическим водопотреблением луговых экосистем, обеспечиваемый естественными осадками, и ресурсами осадков.

Анализ баланса между экологическим водопотреблением при орошении и ресурсами осадков. Хотя искусственно созданные леса и однолетние луга нуждаются в орошении, оценками осадков в данном случае пренебрегать не следует. Поэтому в данном исследовании утверждается, что экологическое водопотребление искусственно созданных лесов и однолетних лугов остается дефицитным после

вычета годовых сумм осадков; поэтому был проведен анализ баланса ресурсов осадков и ресурсов орошения для искусственно созданных лесных и луговых экосистем. Согласно рисунку 6, анализ баланса годовых осадков показывает, что лесные и луговые экосистемы в округах Цзинюань, Лундэ и Пэнъян не нуждаются в орошении как для минимальных, так и для достаточных условий водопотребления. При минимальном водопотреблении луговых экосистем в других округах не требуется дополнительное привлечение воды, тогда как лесные питомники требуют орошения. Для формирования достаточного водопотребления луговых и лесных экосистем в этих районах требуется дополнительное привлечение воды. Приведенный выше анализ, основанный на среднегодовых данных, приближенный; необходимы дальнейшие исследования по анализу ежемесячного баланса.

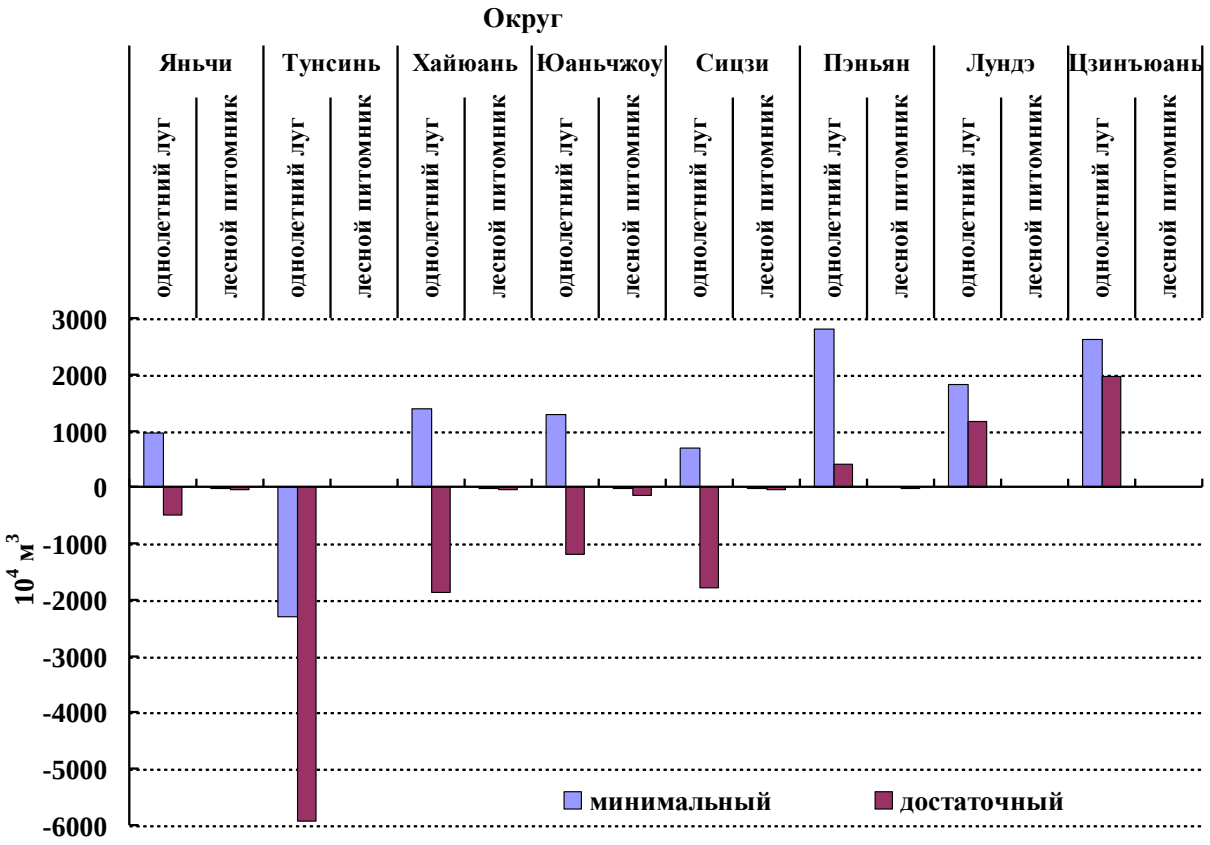

Рис. 6. Баланс между экологическим водопотреблением растительности при орошении и ресурсами осадков.

Соотношение между экологическим водопотреблением, обеспечиваемым осадками, и региональными водными ресурсами. Был проведен анализ баланса между экологическим водопотреблением, обеспечиваемым осадками, и региональными водными ресурсами для выявления соотношения между ними, и для дальнейшего определения взаимосвязи между количеством воды, необходимой для экологического строительства, и водными ресурсами. При оценке баланса между водными ресурсами и экологическим водопотреблением лесных и луговых экосистем, формирующимся за счет осадков, используются два понятия: минимальное экологическое водопотребление и достаточное экологическое водопотребление. К тому же, согласно предыдущим оценкам и анализу, доля использования стока при формировании экологического водопотребления лесных и луговых экосистем пренебрежительно мала по сравнению с осадками, формирующими водопотребление, и поэтому в данной работе не учитывается. Анализируется баланс только между экологическим водопотреблением, обеспечиваемым осадками, и ресурсами осадков. Баланс между экологическим водопотреблением и ресурсами осадков может быть выражен как (Guo et al., 2011; Hao et al., 2010; Sun et al., 2016; Zhou et al., 2015; Bai et al., 2014; Hao et al., 2009; Li, Zhang, 2014a, 2014b):

$$W_j + W_{in} = W_{out} + W_d + W_{zf} + \Delta W, \quad (8)$$

где W_j – средние годовые осадки по региону, 10^4 м^3; W_{in} и W_{of} – приток и отток воды соответственно, 10^4 м^3, а W_{of}=0 во всех округах; W_d – средний годовой сток по региону, 10^4 м^3; W_{zf} – среднее годовое испарение, 10^4 м^3; ΔW – изменение среднего годового объема запасов воды, которым для среднегодовых показателей можно пренебречь (ΔW=0).

В таблице 3 представлены результаты расчета баланса водных ресурсов для всех округов, выполненные в соответствии с формулой (8). Среднее годовое испарение в регионе (W_{zf}) включает: испарение основными сельскохозяйственными угодьями, лесами и лугами, получающими питание за счет атмосферных осадков; испарение лесами и лугами, которые питаются за счет стока.

Таблица 3. Экологическое водопотребление, обеспечиваемое осадками и баланс водных ресурсов.

Округ	Q_{jy}, 10^4 м^3		W_j, 10^4 м^3	W_d, 10^4 м^3	W_{in}, 10^4 м^3	W_{zf}, 10^4 м^3	**N, %**	
	Миним.	**Достат.**					**Миним.**	**Достат.**
Яньчи	47069	109424	158380	4070	0	154310	30	71
Тунсинь	58236	90287	113531	2524	1379	112386	52	80
Хайюань	36230	89394	113240	5830	1790	109200	33	82
Юаньчжоу	55500	90153	130530	11985	1645	120190	46	75
Сицзи	41967	83442	132048	8092	78	124034	34	67
Пэнъян	44867	76508	118322	8870	0	109452	41	70
Лундэ	3257	5847	50911	7110	0	43801	7	13
Цзинъюань	2885	5689	70320	19350	0	50970	6	11

Примечание к таблице 3. Q_{jy} – экологическое водопотребление, обусловленное осадками; W_j – средние годовые осадки; W_d – средний годовой сток; W_{in} – приток воды; W_{zf} – среднее годовое испарение; N=Q_{jy}/W_{zf}; Миним. и Достат. – значения при минимальном и достаточном водопотреблении.

Используя данные таблицы 3, расположив округи в порядке убывания отношения величины достаточного экологического водопотребления, обусловленного осадками, к суммарному испарению: Тунсинь, Хайюань, Юаньчжоу, Пэнъян, Яньчи, Сицзи, Лундэ и Цзинъюань, – можно заметить общую тенденцию убывания этого отношения с севера на юг. Доля минимального экологического водопотребления, обусловленного осадками, по отношению к суммарному испарению в округах Яньчи, Тунсинь и Хайюань центральной аридной зоны и округах Юаньчжоу, Сицзи и Пэнъян в южной горной области составила 30-52%, а соответствующее значение для достаточного экологического водопотребления составило 67-82%. Все эти доли довольно значительные, но, в общем, разница между ними мала. Остальную часть суммарного испарения можно отнести к испарению воды почвой и испарению на отдельных подходящих для леса участках и пустошах; эта часть относится к непродуктивным потерям воды на испарение. Таким образом, остается определенное место для распространения на этой территории растительности. Вполне реально увеличить область распространения лесной и луговой растительности на пустоши и подходящие для леса земли, для чего необходимо совершенствовать технологии, направленные на сохранение почвенной влаги и перевода непродуктивных потерь воды на испарение в экологическое водопотребление, что позволит полностью использовать ресурсы осадков и улучшить экологическую среду. В округах Лундэ и Цзинъюань, расположенных в южной горной местности, доля экологического водопотребления, обусловленного осадками, в суммарном испарении небольшая, что свидетельствует о наличии больших возможностей для распространения лесной и луговой растительности в этих двух округах.

Выводы

1. Для расчета регионального экологического водопотребления использованы методы Торнтвэйта и Пенмана-Монтейта; в исследовании впервые было выполнено сравнение полученных результатов.

Сделан вывод, что результаты, полученные по методу Пенмана-Монтейта, учитывающему различные метеорологические и географические факторы, более обоснованы; результаты расчетов потенциального испарения по методу Торнтвэйта для лета близки к аналогичным результатам, полученным по методу Пенмана-Монтейта, поэтому метод Торнтвэйта может быть использован для расчета потенциального испарения летом в районах с недостатком данных.

2. Потенциальное испарение (ET_0) в 8 округах показывает устойчивую тенденцию изменения. Потенциальное испарение возрастало с января по июль, а затем уменьшалось с августа по декабрь. Его значение достигло максимума в июне или июле и составляло более 100 мм/месяц. В пространственном распределении потенциального испарения отмечается тенденция его увеличения с юга на север, наименьшими значениями характеризуются округа Цзинъюань и Лундэ в южной горной местности, наивысшими – округа Тунсинь и Хайюань в центральном аридном регионе.

3. Минимальное и достаточное экологическое водопотребление лесных и луговых экосистем в округах Лундэ и Цзинъюань, расположенных в южных горных районах со среднегодовым количеством осадков 350-550 мм, может быть удовлетворено за счет осадков; растительность лесов и лугов здесь находится в хорошем состоянии. Минимальное экологическое водопотребление лесных и луговых экосистем в округах Пэнъян и Юаньчжоу, расположенных в южных горных районах со среднегодовым количеством осадков около 350 мм, может быть удовлетворено за счет осадков, в то время как достаточное экологическое водопотребление – не может. В этих округах необходимо обоснованное планирование структуры посадки лесов и лугов. Минимальное и достаточное экологическое водопотребление лесных и луговых экосистем в округах Хайюань, Яньчи и Тунсинь, расположенных в центральной засушливой области, и округе Сицзи в южном горном районе со среднегодовым количеством осадков 175-280 мм не может быть обеспечено естественными осадками, поэтому в этих областях не следует планировать широкомасштабное развитие лесных и луговых массивов.

4. Доли минимального Доля минимального экологического водопотребления, обусловленного осадками, по отношению к суммарному испарению в округах Яньчи, Тунсинь и Хайюань центральной аридной зоны и округах Юаньчжоу, Сицзи и Пэнъян в южной горной области довольно значительная, но, в общей сложности разница между ними мала. Остальную часть суммарного испарения можно отнести к испарению воды почвой и испарению на отдельных подходящих для леса участках и пустошах; эта часть относится к непродуктивным потерям воды на испарение. Таким образом, остается определенное место для распространения на этой территории растительности. Вполне реально увеличить область распространения лесной и луговой растительности на пустоши и подходящие для леса земли, для чего необходимо совершенствовать технологии, направленные на сохранение почвенной влаги и перевода непродуктивных потерь воды на испарение в экологическое водопотребление, что позволит полностью использовать ресурсы осадков и улучшить экологическую среду. В округах Лундэ и Цзинъюань, расположенных в южной горной местности, доля экологического водопотребления, обусловленного осадками, в суммарном испарении небольшая, что свидетельствует о наличии больших возможностей для распространения лесной и луговой растительности в этих двух округах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Bai Y., Xu H., Ling H., Wang X. 2014. Spatial distribution and ecological water requirement of natural vegetation in trunk region of Tarim River // Journal of Desert Research. No. 34 (5). P. 1410-1417.

Chu B., Shang S. 2009. Methods for calculating water requirement and consumption of forest and grass vegetation in river valley and their application // Water resource response and sustainable utilization in changing environment: Proceedings of 2009 academic annual conferences. Committee on Water Resources, Chinese Hydraulic Engineering Society. Dalian: Dalian University of Technology Press. P. 479-482.

Deng J. 2009. Research on the rational allocation of ecological water and water resources in Weihai. Beijing: Beijing Forestry University. P. 72-77.

Gao K. 2008. Study on ecological water requirement in western Jili. Changchun: Master’s Thesis of Jilin University. 5 p.

Guo Q., Yang Y., Li J., Chen Z. 2011. Study on ecological water requirement of Ejina oasis and prediction // Arid Land Resources and Environment. No. 25 (5). P. 135-139.

Hao B., Su X., Ma X. 2010. Study on ecological water requirement of natural vegetation in Minqin county of Gansu // Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry (Natural Science Edition). No. 38 (2).

P. 243-250.

Hao B., Su X., Ma X., Zhang D. 2009. Research progress of ecological water requirement of vegetation in arid areas // Journal of Water Resources and Hydraulic Engineering. No. 20 (4). P. 135-139.

He Y., Li W., Li G., Min Q., Zhao H. 2004. Study on ecological water requirement of forest vegetation in Loess Plateau region // Environmental Sciences. No. 25 (3). P. 35-39.

Hu Sh., Pan Y., Kang Sh., Song Y., Tian Ch. 2005. Comparison of potential evapotranspiration estimates for reference crops in Tarim Basin using Penman-Monteith and modified Penman methods // Agricultural Engineering Journal. No. 21 (6). P. 30-33.

Jia B., Ci L. 2000. Preliminary estimation of ecological water requirement in Xinjian // Acta Ecologica Sinica. No. 18 (2). P. 243-250.

Li J., Zhang W. 2014a. Study on ecological water requirement of vegetation along river courses in Guyuan, Ningxia // Yellow River. No. 36 (1). P. 57-60.

Li J., Zhang W. 2014б. Study on ecological water demand of forest and grass vegetation in arid region in central and southern Ningxia // Bulletin of Soil and Water Conservation. No. 34 (2). P. 276-280.

Min Q., Geng Y. 2005. Estimation and analysis of ecological water requirement in Jinghe drainage basin // Resource Science. No. 27 (4). P. 14-17.

Shen G. 2001. Ecological environment construction and water resources protection and utilization // Soil and Water Conservation in China. No. 23 (1). P. 4-7.

Statistics of Areas and Structures of Forestlands and Grasslands in Counties of Ningxia Hui Autonomous Region. Forestry Department of Ningxia Hui Autonomous Region. 2014.

Sun D., Hu X., Jin Y., Zhang Y., Li Y. 2016. Estimation and prediction of ecological water requirement of natural vegetation in middle reaches of Shule River // Arid Land Geography. No. 39 (1). P. 154-162.

Wang M., Li H. 1995. Quantitative study on soil moisture dynamics of artificial woodlands in the loess region of northwest Shanxi Province // Acta Ecologica Sinica. No. 15 (2). P. 178-184.

Yang Z., Cui B., Liu J. 2003. Theory of ecological water requirement, methods, and practice Beijing: Science Press. P. 122-72.

Zhou D., Shen Y., Chen Y., Guo Y., Zhang B. 2015. Estimation of ecological water requirement of desert vegetation in northwest arid region // Chinese Journal of Ecology. 34 (3). P. 670-680.