

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtq.2019.0045

陈珂, 杨胜天, 江砥, 等. 喀斯特石漠化典型区蓝水绿水转化模拟[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(2): 146-156. CHEN K, YANG S T, JIANG D, et al. Simulations on the conversion of blue water into green water in a typical karst rocky desertification area[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(2): 146-156. (in Chinese)

喀斯特石漠化典型区蓝水绿水转化模拟

陈珂¹, 杨胜天², 江砥¹, 管亚兵², 黄勇奇¹, 戴国富¹

(1. 黄冈师范学院 地理与旅游学院, 湖北 黄冈 438000; 2. 北京师范大学 水科学研究院, 北京 100875)

摘要: 由渗漏导致的降水大量流失是造成喀斯特石漠化地区地表水短缺的主要原因, 将渗漏的难利用蓝水转化为可供植被生长利用的生态绿水是目前技术条件下提高水资源利用量的有益探索。基于蓝水绿水理论和土壤—植物—大气连续体 (SPAC) 原理, 通过采用 EcoHAT 系统水循环模型模拟贵阳市非城镇地区的蓝水绿水转化, 发现: (1) 研究区绿水占降水的份额不到 50%, 远低于全球 65% 的平均水平, 具有很大的转化利用潜力; (2) 增加植被覆盖度和增厚土层均能实现将渗漏蓝水转化为生态绿水, 增厚土层的转化效果更为显著; (3) 增加植被覆盖度对减少渗漏的转化作用存在一个明显的阈值, 当植被覆盖度增长到 56% 左右时, 其减少渗漏的作用急遽减弱。鉴于研究区石漠化的典型性, 本研究对类似地区提高水资源利用量具有一定参考意义。

关键词: 喀斯特; 石漠化; 蓝水; 绿水; 生态; EcoHAT; 贵阳

中图分类号: P426 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Simulations on the conversion of blue water into green water in a typical karst rocky desertification area

CHEN Ke^{1,2}, YANG Shengtian², JIANG Di¹, GUAN Yabing², HUANG Yongqi¹, DAI Guofu¹

(1. College of Tourism Culture and Geography, Huanggang Normal University, Huanggang 438000, China;

2. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: The leakage of large amount of precipitation was the main cause of surface water shortage in karst rocky desertification areas. The conversion of the leaking hard-to-use blue water into ecological green water for vegetation growth and utilization was a useful exploration to improve water resource utilization under current technical level. Based on the Blue Water & Green Water Theory and the Soil-Plant Atmosphere Continuum (SPAC) Principle, the conversion of blue water into green water in non-urban areas of Guiyang city was simulated with the Water Cycle Model of EcoHAT System in this study. It was found that: The green water in the study area accounted for less than 50% of the precipitation, which was far below the global average of 65%, and with great potential for conversion and utilization. Increasing vegetation coverage and thickening soil layer could enhance the process converting the leakage blue water into ecological green water, and the effects of thickened soil layer was more significant than those of increasing vegetation. If the vegetation coverage was increased to 56% or above, which was an thresholded, the effects on leakage was then limited. The research results of this paper would provide an add-value reference for improving water resources utilization in the similar rocky desertification areas.

Key words: karst; rock desertification; blue water; green water; ecology; EcoHAT; Guiyang

收稿日期: 2018-07-25 修回日期: 2018-12-25 网络出版时间: 2019-01-28

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190128.1023.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金新疆联合基金(U1603241)

作者简介: 陈珂(1975—), 男, 贵州织金人, 讲师, 博士, 主要从事遥感水文研究。E-mail: chenkebj2000@sina.com

通信作者: 杨胜天(1965—), 男(彝族), 贵州贵阳人, 教授, 博士, 主要从事遥感水文研究。E-mail: yangshengtian@bnu.edu.cn

由历史上植被破坏导致的土壤流失和岩石出露地表,是加剧喀斯特石漠化地区降水渗漏流失的直接原因^[1-2],致使当地水资源利用量低于同等降水条件的非喀斯特地区^[3]。相当一部分学者认为,喀斯特石漠化地区属于工程性缺水,可通过修建大中型蓄水工程来提高当地水资源的利用量^[4-5]。实践表明,在喀斯特地区修建大规模的蓄水工程,不仅成本巨大^[6-7],而且石灰岩的渗透性对于水库等蓄水工程也构成潜在隐患^[8-9]。为此,有必要探索适宜于喀斯特石漠化地区提高水资源利用的新途径。

生态水文学将陆地表面的降水划分为“绿水”和“蓝水”两部分,绿水指供给植被生长代谢用的气态水或饱和土壤水,其中直接用于植物蒸散发的部分为绿水流,用于补充土壤水蓄变量的部分为绿水储存;蓝水指以液态形式供给水生生态系统或人类利用的另一部分降水^[10-11]。研究发现,全球绿水约占降水总量的65%,蓝水约占降水总量的35%^[12],越是湿润的地区绿水所占降水比例越高^[13]。在我国相对湿润的西南喀斯特石漠化地区,由于植被破坏,导致原本应参与植被生长代谢的大量绿水最终以蓝水的形式渗漏流失。如果能够采取适当措施将这部分渗漏蓝水转化为可供植被生长利用的生态绿水,将有利于提高当地的水资源利用量,促进生态与经济可持续发展。

我国西南地区是世界上喀斯特地貌分布比较集中、石漠化危害较为严重的地区^[14-15],针对喀斯特地区石漠化治理及生态恢复,众多学者展开了广泛而深入的研究,其中通过调节绿水分配份额,从生态恢复角度实现对石漠化的治理,正逐渐被重视。

Yuan 与万军等^[16-17]认为喀斯特生态环境相对脆弱、土壤贫瘠,植被生长过度依赖于生境条件;杜睿等^[18]指出,是土壤含水量的变化导致了植被类型的演替,可见,植物生长对土壤水分依赖程度较大;王志强等^[19]认为,“天然植被经过长期演替,具有自组织能力,能够适应一定的土壤水分状况”,为绿水变化与植被演替之间的相关关系研究提供了宝贵的线索;王玉娟等^[20]在对贵州喀斯特典型地貌区龙里实地实验后认为,应当通过增加植被盖度和减少裸地面积,来加强对当地绿水资源消耗利用的调控;温志群等^[21]采用 EcoHAT 系统对植被蒸散量进行估算后,认为通过把更多的降水转化为绿水,将更加有利于喀斯特石漠化地区的植被生态恢复;杨胜天^[22]基于 EcoHAT 系统实验结果指出,贵州省喀斯特地区由于乱砍滥伐、陡坡垦殖等人类活动加剧了水土流失和石漠化,导致绿水存量逐渐减少,针对“蓝—

绿水”转化与管理的研究亟待开展。

综上所述,目前学术界对绿水与喀斯特地区植被生态系统相互作用的研究已经达到一定深度,对绿水减少的机理也已有初步认识,即由于土壤贫瘠、植被破坏、岩溶易渗透性等原因,导致尽管我国西南喀斯特地区降水丰富,却大量渗漏流失。因此,当前面临的问题主要是如何将当地难以直接利用的渗漏蓝水转化为可供植被生长代谢用的生态用绿水、以及转化多少。

基于此,本文拟开展以下方面的研究。

(1)通过对蓝水绿水转化进行模拟并结合观测数据,初步明晰研究区蓝水与绿水的总量及空间分布。

(2)探索将喀斯特石漠化典型区渗漏蓝水转化为生态绿水的可行措施。

(3)基于模型计算,分析不同“蓝—绿”水转化措施的效果。

1 研究区概况

贵阳市是贵州省的省会,总面积约8 034 km²,地处贵州中部,位于云贵高原东北部长江与珠江的分水岭区域,在东经 106°07′~107°17′、北纬 26°11′~27°22′,喀斯特面积约为6 830.26 km²,超过全市总面积的80%^[23-24]。由于历史上大炼钢铁及开荒种地引发的乱砍滥伐,造成当地天然林退化严重,致使约85%的地区出现不同程度的石漠化^[25]。贵阳市多年平均降水量为1 100 mm,2013年森林覆盖率约为44.2%,鉴于当地水土流失严重、地表石多土少,是典型的喀斯特石漠化地区^[26-27],本文选取贵阳市非城镇地区(面积约7 495 km²)作为研究区。

2 研究方法

2.1 数据来源

本文对蓝水绿水转化过程进行模拟的数据按属性分为基础地理空间数据和气象水文数据,基础地理空间数据主要通过 MODIS 遥感产品获取,包括每日反照率、每日地表温度、植被覆盖度、土地利用、地表辐射、土壤质地等数据。根据模型计算需要和遥感数据获取情况,空间分辨率采用1 km精度;由于2003年之前研究区的部分 MODIS 产品数据缺失,而本研究于2015年启动时,2014年之后的部分遥感数据尚不能下载,并且一部分作为验证用的2014年之后的水文观测数据,官方网站也尚未发布,因此选取2003年作为研究的初始年,2013年作为现状年。考虑到作为重要计算指标的植被盖度,

在区域尺度上的年度变化并不明显,为便于模型计算的比较分析,仅选取了 2003 年、2007 年和 2013 年的实际数据参与计算。

2.2 蓝水绿水转化模拟

根据“土壤-植物-大气连续体 (Soil-Plant-Atmosphere Continuum)”即 SPAC 原理^[28-29],绿水可以通过对区域蒸散发量的估算求得,而蓝水亦可通过将降水量减去绿水量获得。鉴于北京师范大学生态水文研究团队开发的 EcoHAT 系统,此前已多次应用于贵州喀斯特石漠化地区的蒸散发量计算^[21,30-31],本文采用 EcoHAT 系统水循环模型,对研究区蓝水与绿水转化进行模拟。该模型主要涉及蒸散发和土壤水运移的运算,分别介绍如下。

2.2.1 潜在蒸散发计算

EcoHAT 系统水循环模型对潜在蒸散发量的计算采用 Priestley-Taylor 公式

$$ET_p = \alpha \left(\frac{R_n - G}{\lambda} \right) \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) \quad (1)$$

式中: ET_p 为潜在蒸散发量 (mm); α 为 Priestley-Taylor 系数; R_n 为地表净辐射量 (W/m^2); G 为土壤热通量 (W/m^2); λ 为汽化潜热 (MJ/kg); Δ 为饱和水气压-温度曲线斜率 ($kPa/^\circ C$); γ 为干湿表常数 ($kPa/^\circ C$)。Priestley-Taylor 公式自提出以来,被广泛用于对蒸散发量的估算^[32-34],关于参数 α 的取值, Priestley 和 Taylor 分析了海洋和大陆范围饱和和陆面资料,认为其最佳取值应为 1.26^[35]。各地区 α 的取值因受时空变异的影响而有所不同,赵玲玲等根据 1973—1983 年逐月蒸散发量数据,对紧临贵阳市的鸭池河流域进行研究后,建议该区域的 α 取值为 1.16^[36],本文采用赵玲玲的研究成果。

2.2.2 实际蒸散发计算

通过潜在蒸散发量,结合 Ritchie 公式计算出实际土壤蒸发量^[37],公式为

$$EP_s = \begin{cases} ET_p \times (1 - 0.43 \times LAI) & LAI \leq 1 \\ ET_p \times \exp(1 - 0.4 \times LAI) & 1 < LAI < 3 \\ 0 & LAI > 3 \end{cases} \quad (2)$$

式中: EP_s 为潜在土壤蒸发量 (mm); ET_p 为潜在蒸散发量 (mm); LAI 为叶面积指数。实际土壤蒸发量可由下式得出

$$EP_s = EP_s \times K_{ss} \quad (3)$$

式中: EP_s 为实际土壤蒸发量 (mm); K_{ss} 为水压力指数。

2.2.3 植被截留量计算

采用 Aston 所构建的植被截留计算公式^[38]

$$S_v = C_v \times S_{max} \times (1 - e^{-\eta \frac{P_{cum}}{S_{max}}}) \quad (4)$$

式中: S_v 为累计降水截留量 (mm); C_v 为植被盖度 (%); P_{cum} 为累计降水量 (mm); S_{max} 为最大冠层截留量 (mm); η 为校正系数。

$$C_v = 1 - e^{-K \times LAI} \quad (5)$$

式中: K 为消光系数; 与太阳光照条件相关; LAI 为叶面积指数。

2.2.4 土壤水运移计算

当侧向径流忽略不计时,可用一维垂向的土壤水分运动数学模型来模拟实际土壤水运动,渗漏量亦可由土壤水运移分量获得。描述一维垂向土壤水运动的 Richard's 方程^[39-40]及其数学模型定解可由式 6 求得

$$\begin{cases} C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \frac{\partial h}{\partial z} \right] - \frac{\partial K(h)}{\partial z} \\ h(z, 0) = h_0(z) & (0 \leq z \leq L_z) \\ \left[-K(h) \frac{\partial h}{\partial z} + K(h) \right]_{z=0} = \begin{cases} -E(t) \\ Q(t) \end{cases} & (t > 0) \\ h(L_z, t) = h_1(t) & (t > 0) \end{cases} \quad (6)$$

式中: h 为土壤水基质势 (即土壤水负压水头, cm); $C(h)$ 为土壤容水度 ($1/cm$), $C(h) = -d\theta/dh$; $K(h)$ 为非饱和水力传导率 (cm/min); $E(t)$ 为表土水分蒸发强度 (cm/min); $Q(t)$ 为降水入渗强度; z 为空间坐标; t 为时间坐标; L_z 为模拟区域垂向总深度。根据杨胜天等的实地研究成果,研究区平均土层厚度按 40 cm 计算^[21-22]。

2.2.5 渗漏量计算

贵阳市属于湿润的喀斯特地区,如果土壤水蓄变量超过饱和含水率,超过部分可近似视为渗漏量,则渗漏量的计算可采用如下公式

$$I_n = (\Delta W - W_s) \times H_s \times \rho_s / \rho_w \quad (7)$$

式中: I_n 为渗漏量 (mm); ΔW 为土壤水蓄变量 (%); W_s 为饱和含水率 (%); H_s 为土壤厚度 (mm); ρ_s 为土壤容重 (g/mL), ρ_w 为水的比重 (g/mL)。

土壤水蓄变量可采用下式计算^[41-42]

$$\Delta W = \sum (W_{i+1} - W_i) \quad (8)$$

式中: ΔW 为土壤水蓄变量; W_i 为第 i 时段的土壤含水量。

土壤含水量可通过下式求得

$$W = \begin{cases} \frac{P_1 P_2}{P_2 + |h|^{P_3}} P_4 & (h < 0) \\ W_s & (h \geq 0) \end{cases} \quad (9)$$

式中: W 为土壤含水量; W_s 为饱和土壤含水量; h 为土壤水基质势; P_1, P_2, P_3, P_4 为拟合参数; 其中 P_4

为残留含水量, $P_1 + P_4 = W_s$ 。

根据研究区不同的土壤质地, P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 取值参见表 1^[43-44]。

表 1 土壤水分运移计算参数
Tab. 1 Parameters of soil water transport

土壤类型	P_1	P_2/cm	P_3	P_4	$K_s/(cm \cdot min^{-1})$
重黏土	0.28	70.030	0.66	0.27	0.000006
轻黏土	0.28	50.159	0.63	0.16	0.000060
粉质黏土	0.31	175.995	0.80	0.11	0.000600
壤土	0.32	186.441	0.86	0.09	0.006000
砂质壤土	0.28	247.682	0.92	0.09	0.060000

2.2.6 径流量计算

利用水量平衡方程式可以确定降水、蒸发、径流

表 2 初始年和现状年研究区蓝水绿水各分量模拟值

Tab. 2 Component values of blue water and green water in the initial year and current year

分量类别	V_c	P	E	T	I	ΔW_s	R	$W_{infiltr}$	W_{Green}
初始年(2003年)	49.75	968.23	91.67	182.86	35.05	151.77	506.87	83.31	461.36
现状年(2013年)	60.93	922.06	82.67	204.23	40.04	131.73	463.38	70.24	458.68
变化幅度/%	22.50	-4.80	-10.00	11.69	14.20	-13.20	-8.60	-16.00	-0.60

注:表中 V_c 为植被覆盖度(%), $W_{infiltr}$ 为渗漏量(mm), W_{Green} 为绿水总量(mm), 其他符号意义同前。根据蓝水和绿水的概念, 径流量 R 为研究区蓝水总量, 渗漏量 $W_{infiltr}$ 为蓝水的构成部分; E 、 T 、 I 、 ΔW_s 均为绿水构成部分。

模型计算结果显示, 尽管初始年和现状年降水量相差达 40 mm, 相差幅度为 4.8%, 但两个年份绿水总量构成之间基本没有太大的差异, 变化幅度为 0.6%, 体现了研究区蓝绿水构成的相对稳定性。在植被盖度增加 22.5% 的情况下, 植被蒸腾量和截留量分别增长了 11.69% 和 14.2% (参见表 1), 这与植被对降水截留与蒸腾等的作用特点相符; 由于蒸腾和截留的增加导致土壤蒸发量、蓄变量、径流量和渗漏量的相应减少, 也与水量平衡原理基本相符, 这在一定程度反映了 EcoHAT 系统模型计算结果的合理性。初始年与现状年蓝绿水各分量值变化情况参见图 1。

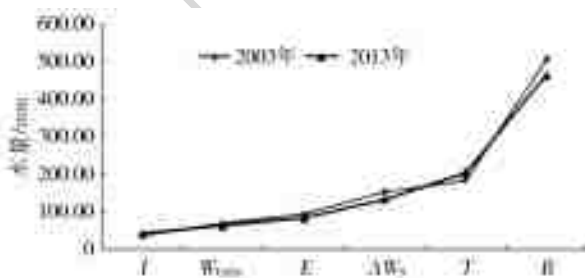


图 1 EcoHAT 系统计算的初始年和现状年蓝水绿水各分量值

Fig. 1 Component values of blue water and green water in the initial year and current year simulated by EcoHAT system

从蓝水与绿水的构成来看, 2003 年蓝水总量为 506.87 mm, 绿水总量为 461.36 mm, 蓝水与绿水占

等水文要素间的数量关系, 进而计算出研究地区的径流量。采用公式

$$R = P - I - T - E - \Delta W_s \quad (10)$$

式中: R 为径流量; P 为降雨量; I 为植被截留量; T 为植被蒸腾量; E 为土壤蒸发量; ΔW_s 为土壤水蓄变量(注: 上式中所有变量单位均为 mm)。

3 结果与分析

3.1 初始年和现状年蓝水绿水模拟

通过 EcoHAT 系统模拟研究区植被蒸散发量, 并结合水量平衡原理, 计算得到初始年(2003 年)和现状年(2013 年)研究区蓝绿水各分量数值见表 2。

当年降水量的比例分别为 52.35% 和 47.65%; 2013 年蓝水总量为 463.38 mm, 绿水总量为 458.68 mm, 蓝水与绿水占当年降水量的比例分别为 50.25% 和 49.75%。可见, 初始年和现状年的绿水模拟值占降水量的比例均不到 50%, 远低于全球 65% 的平均水平; 2003 年和 2013 年的渗漏量占降水量的比例分别 8.60% 和 7.61%, 表明在将难利用的渗漏蓝水转化为对植被生长有用的生态绿水(蒸散发和土壤水蓄变量)方面, 有较大可调控空间。

为便于直观分析研究区蓝水与绿水分布, 基于模型计算结果, 分别生成研究区初始年与现状年渗漏量分布图, 以及相应的植被盖度图和土壤质地图。如图 2 所示, 初始年与现状年的渗漏地带空间分布基本一致; 渗漏地带分布与植被覆盖在空间上的分布并无明显相关性, 从侧面反映出植被退化并不是导致渗漏的根本原因; 严重渗漏区域(渗漏量大于 180 mm)均位于土壤水传导率相对高的壤土区内, 但壤土区并不都是渗漏严重的区域, 表明渗漏是否严重应与土壤质地有一定关系, 但也受到其他因素的影响。

3.2 模型计算结果验证

对于模型各项计算结果数值的验证, 除蓝水渗漏量的验证, 由于缺少观测资料难于直接验证外, 其余各值均可通过查阅相关文献资料获取验证值。因

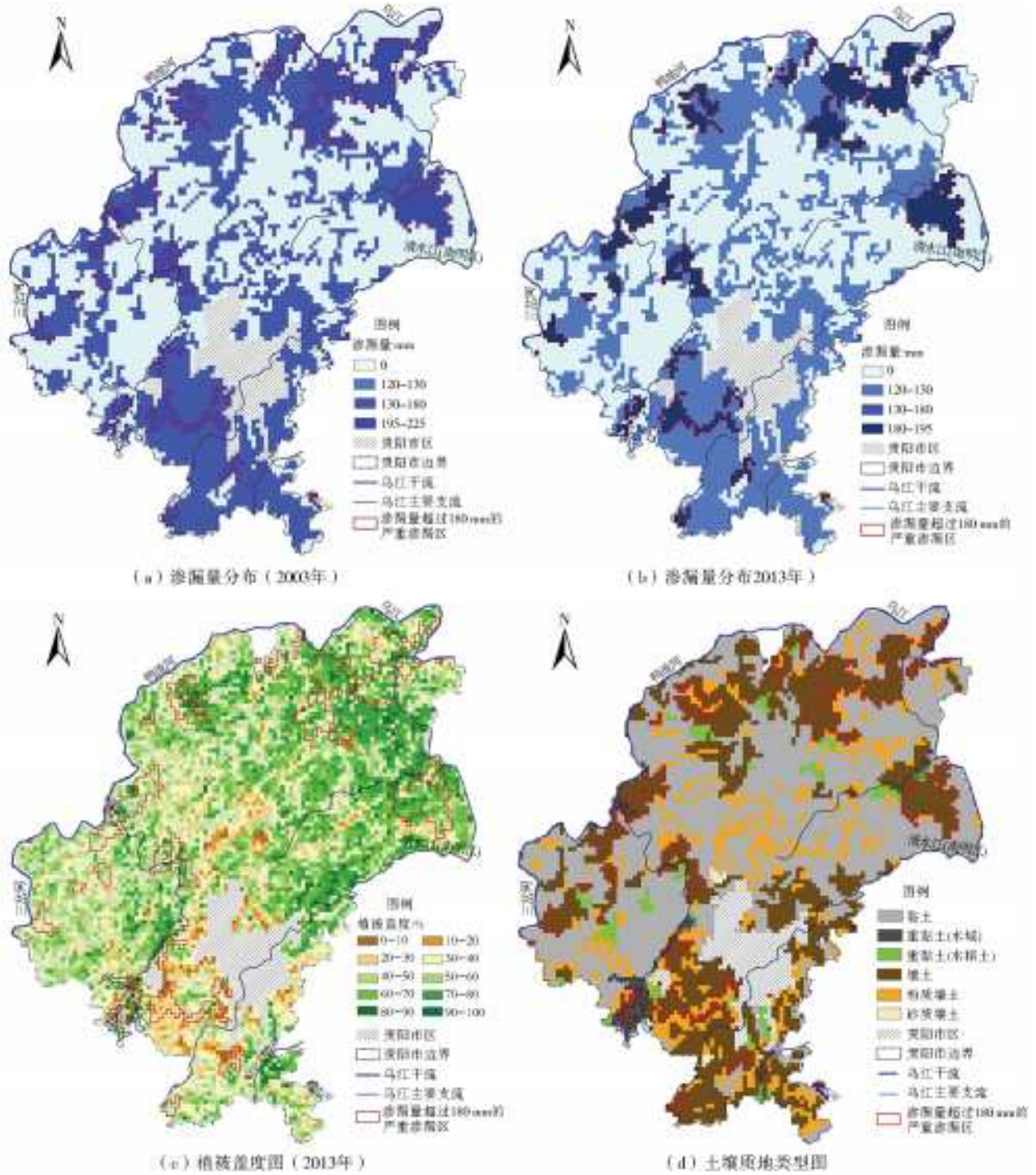


图 2 研究区渗漏量空间分布模拟

Fig. 2 Spatial distributions of leakage volume in study area

此,对渗漏量可采取间接验证方式,通过验证参与计算的各水文分量的值,再根据水量平衡原理,达到验证渗漏量计算精度的目的。

径流量验证数据可通过贵阳市水务局发布的《水资源公报》获得,植被降水截留量的验证值来源于张喜等^[45]在贵阳市开阳县的实地观测数据;蒸腾量、土壤蒸发量和饱和水含量的验证值根据张志才等^[46]在同为喀斯特地区且与贵阳相邻的普定县陈旗小流域利用 Perman-Monteith 方法计算的结果,

土壤水蓄变量验证值根据温志群等^[21]在贵阳及周边地区计算的土壤水蓄变率获得。模型模拟值与验证值参见表 3。

表 3 模型模拟值与验证值对照

Tab. 3 Simulated and verified values 单位:mm

数据类别	E	T	I	ΔW_s	$W_{\text{Sat}}^{\text{r}}$	R
模拟值 (2003)	91.67	182.86	35.05	151.77	68.46	506.87
模拟值 (2013)	82.67	204.23	40.04	131.73	61.49	463.38
验证值	85.28	197.52	48.65	170.57	96.74	417.90

注:表中 $W_{\text{Sat}}^{\text{r}}$ 为土壤饱和含水量,其他符号意义同前。

表3中数值显示,径流量的模拟值和验证值之间相差较大,原因是验证值417.9 mm来自2013年水资源公报数据,而同年贵阳市统计年鉴显示,径流量数值为50.21亿m³,换算为径流量应为624.9 mm,两者相差高达200 mm。由于统计年鉴数值与水资源公报数值同样来源于水行政主管部门,这种差异应该产生于统计上报过程中,可归类为观测误差,不影响对模型计算结果的可信度评价。其次,土壤水蓄变量的验证值比模拟值稍偏大,根据温志群等的解释,主要原因为其观测时段从9月至次年3月,该时段的平均次降雨雨强较小,降雨历时相对长、气温低,植被蒸散发较弱,处于植被生长缓慢期,因此降水大多用于补给绿水储存部分,导致土壤含水量增长较快,土壤水蓄变量也较其他时段要高;而模拟值计算的是全年的平均数,自然偏低于验证值^[20]。另外,饱和含水量的验证值也偏高于模拟值,原因应与验证值来自对小流域的观测,而模拟值由较大区域数值平均后得到有关。其他变量的模拟值和验证值之间的差异不是很明显,显示由EcoHAT模型计算的各水文分量值与验证值之间具有良好的相似度。模型模拟值与验证值的相似度参见图3。

图3中模拟值的分布均接近于45°线,显示由EcoHAT系统计算而得的蒸散发量及土壤水运移量与验证值之间具有良好相似度,根据水量平衡原理,渗漏量模拟值也应该具有良好的可信度。

3.3 蓝水绿水转化模拟

根据SPAC原理,在水循环的三大环节中,以现有技术而言,人类难以改变大气运动或降水过程,却

可以通过改变植被覆盖度和土壤厚度等地表因素来影响降水的分配,从而实现将喀斯特石漠化地区渗漏的难利用蓝水转化为可供植被代谢利用的生态绿水。

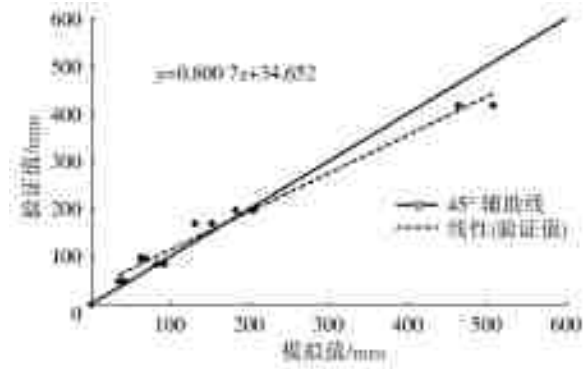


图3 蓝水绿水各分量模拟值与验证值相似度
Fig. 3 Degree of similarity between the simulated and verified values

3.3.1 增加植被对“蓝—绿”水转化的模拟分析

鉴于在土壤条件不变的情况下,能够对陆面水循环产生影响的另外两大因素分别为大气降水和植被变化。可假定降水量不变,模拟植被变化下的渗漏量变化。利用MODIS数据反演植被盖度发现,2003年至2013年,研究区植被盖度增长幅度接近10%;为便于比较,在进行模拟时,按植被盖度每增长5%作为一个时间间隔,由于2007年研究区植被盖度刚好在2003年的基础上增长约5%,将2007年数据纳入模型计算。同时,为分析植被盖度小幅变化对渗漏量的影响,在2013年基础上,增加模拟植被盖度增长1%和2%的影响,模拟结果参见表4。

表4 植被盖度增长对渗漏量和蓝水绿水各指标变化的影响

Tab. 4 Impacts of vegetation coverage increase on leakage

模拟情景	V _c (%)	P	E	T	I	ΔW _s	R	W _{Infiltr}	W _{Green}
2003年	49.75	968.23	91.67	182.86	35.05	151.773 0	506.87	83.311 6	461.36
2007年	55.93	968.23	87.56	204.08	37.83	149.883 6	488.87	82.323 8	479.35
2013年	60.93	968.23	82.23	224.57	42.97	149.837 8	468.62	82.295 3	499.61
V _c +1%	61.91	968.23	81.57	228.64	43.70	149.837 5	464.48	82.295 0	503.75
V _c +2%	62.91	968.23	80.76	232.87	44.46	149.836 6	460.29	82.294 5	507.93
V _c +5%	65.93	968.23	78.24	246.11	46.89	149.835 4	447.16	82.293 4	521.08
V _c +10%	70.93	968.23	73.61	269.80	51.40	149.832 0	423.58	82.291 9	544.64

通过对表4的分析发现:

(1)在保持降水量不变的条件下,随着植被盖度的增加,径流量不断减少,绿水总量保持相同数值的增加,表明在植被增长模式下,绿水的增长来源于蓝水径流量的转化;

(2)随着植被盖度的增加,研究区渗漏量呈不断减少的趋势,尽管减少的绝对值与绿水总量的增长

相差悬殊,但仍表明植被增长能够在一定程度上将渗漏蓝水转化为生态绿水;

(3)当植被盖度由50%增长到56%左右时,渗漏量减少的幅度最大(1.19%),约为1 mm/km²;

(4)根据表3中数据,按植被盖度每增长5%计算所对应渗漏减少的幅度,汇总如表5所示。发现当植被盖度由50%增长至56%时,渗漏量减幅较大,

此后渗漏量减幅显著下降,且下降幅度越来越小。

表 5 不同植被盖度增长区间对渗漏量减少幅度的贡献
Tab. 5 Contributions of growth intervals of different vegetation coverage to the leakage

植被盖度变化/%	50~56	56~61	61~66	66~71
渗漏量减少幅度/%	1.186	0.035	0.023	0.019

通过对植被盖度增加与渗漏量减少幅度变化的相关性分析发现,植被盖度增长与渗漏量变化之间呈明显负相关的幂指数关系,且植被盖度接近 56% 时,渗漏量减少的拐点作用表现明显(参见图 4)。表明降水不变时,植被盖度增加对减少渗漏的作用可能存在一个阈值,植被盖度增加越接近这一阈值,渗漏量减少幅度变得越小,因此需要借助其他更有效的途径来减少渗漏量。

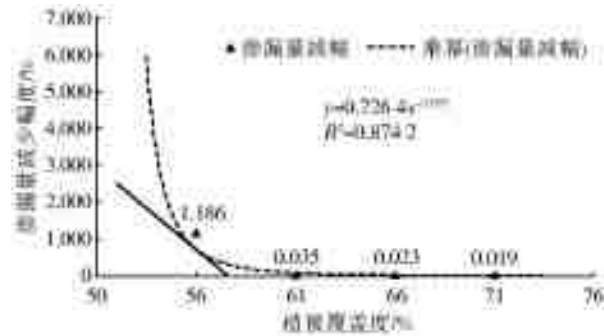


图 4 植被盖度增加与渗漏量减少幅度变化关系示意图
Fig. 4 Relationship between the increase of vegetation coverage and the decrease of leakage

3.3.2 增加土壤厚度对蓝—绿水转化的模拟分析

根据 SPAC 原理,假定降水和植被盖度不变,选取便于模型进行计算与分析的土壤层厚度数值,在原有 40 cm 平均土层厚度基础上,分别增加 10 cm 和 20 cm,对蓝水绿水变化情况进行模拟,经计算得到各主要指标值见表 6。

通过分析表 6 的模拟结果发现:

(1)随着土层的增厚,土壤蒸发量不断升高,土层增厚 20 cm 所增加的土壤蒸发量几乎相当于土层增厚 10 cm 导致增加的蒸发量的 2 倍,表明土壤增加的厚度与所增加的蒸发量的增量之间呈较好的正相关关系;

(2)当土壤增厚 10 cm 时,土壤水蓄变量所增加的 45.81 mm 水量刚好与渗漏减少的量相等,从水量平衡的角度来看,表明增厚土层所减少的渗漏蓝水已全部转化为绿水储存量,此时径流量所减少的 53.22 mm 水量中,45.81 mm 来自于渗漏量的减少,而另外 7.41 mm 用于土壤水蒸发,所减少的蓝水总量全部转化为绿水;

(3)当土壤增厚 20 cm 后,导致减少的 114.82 mm 径流总量中,有 100.11 mm 转化为土壤水蓄变量,另外 14.71 mm 转化为土壤水蒸发,土壤水蓄变量所增加的水量除一部分来自于减少的 64.47 mm 渗漏量外,剩余部分应来自于地表径流量的减少;

表 6 增厚土层对减少渗漏作用的模拟结果

Tab. 6 Simulation results of thickening soil layer effects on leakage

主要因子	2013 年土层厚度	增厚 10 cm 土层厚度计算结果	增厚 10 cm 土层计算结果与 2013 年原值比较	增厚 20 cm 土层厚度计算结果	增厚 20 cm 土层计算结果与 2013 年原值比较
V_c	60.93	60.93	0	60.93	0
P	968.23	968.23	0	968.23	0
E	81.79	89.20	7.41	96.50	14.71
T	206.80	206.80	0	206.80	0
I	42.97	42.97	0	42.97	0
ΔW_s	149.81	195.62	45.81	249.92	100.11
R	486.87	433.64	-53.22	372.05	-114.82
$W_{Infiltr}$	82.29	36.48	-45.81	17.82	-64.47
W_{Green}	481.36	534.58	53.22	596.18	114.82

(4)当土壤在原有基础上增厚 20 cm 后,导致除渗漏蓝水外,高达 114.82 mm 的径流量减少。尽管根据 Tennant 的研究,径流量减少在 40% 以内,不会对水生生态系统产生明显不利影响^[47],但考虑到土壤增厚 20 cm 后,绿水占降水的份额已达 61.57%,接近全球 65% 的平均水平,并且总径流量减少幅度已高达 23.58%,可能会对生态环境产生一定负面作用,

在对进行生态评估之前,不建议再增厚土层。

蓝水绿水变化对增厚土层的响应关系参见图 5。

图 5 显示,渗漏量与土壤厚度变化呈较显著的负指数相关关系,同时两者之间变化也呈稍弱的线性负相关关系,原因应与作为渗漏蓝水转化对象的土壤水蓄变量同时受到蓄变能力增强和径流量减少双重影响有关。

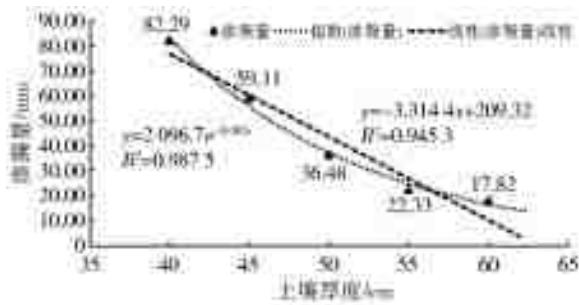


图 5 土壤厚度与渗漏量变化关系

Fig. 5 Relationship between soil thickness and leakage

表 7 增加植被盖度和增加土壤厚度对蓝—绿水转化作用的对比

Tab. 7 Comparison of the effects between increasing vegetation coverage and soil thickness on the conversion of blue water into green water

增加植被盖度				增加土壤厚度			
植被盖度/%	绿水总量/mm	渗漏量/mm	减少渗漏量/mm	土壤厚度/cm	绿水总量/mm	渗漏量/mm	减少渗漏量/mm
49.75	416.09	83.3116	—	40	481.36	82.29	—
55.93	439.80	82.3238	0.9878	45	508.20	59.11	23.18
60.93	463.91	82.2953	0.0285	50	534.58	36.48	22.63
65.93	489.20	82.2934	0.0019	55	565.31	22.33	14.15
70.93	516.59	82.2919	0.0015	60	596.18	17.82	4.71

通过表 7 的数值对比发现,随着植被盖度和土壤厚度的不断增加,绿水总量均呈快速增长的趋势,增厚土层所转化的绿水量明显多于增加植被盖度的转化量。

4 结论

本文基于蓝水绿水理论,采用 EcoHAT 系统水循环模型对喀斯特石漠化典型地区—贵阳市非城镇区的蓝水和绿水变化进行了模拟,分析了增加植被和增厚土层两种方案对将研究区渗漏的难利用蓝水转化为可供植被生长利用的生态绿水的不同效果,研究结论如下。

(1)研究区在初始年和现状年绿水占降水的份额分别为 47.65%和 49.75%,均远低于全球 65%的平均水平,且 2003 年和 2013 年的渗漏量占降水量的比例分别 8.60%和 7.61%,具有将渗漏蓝水转化为生态绿水的巨大潜力。

(2)增加植被覆盖度和增厚土层是实现将渗漏蓝水转化为生态绿水的有益途径,增厚土层的转化效果较增加植被更为显著。

(3)增加植被覆盖度对减少渗漏的转化作用存在一个明显的阈值,即在植被覆盖度增长到 56%左右后,增加植被对减少渗漏的作用急遽减弱。

探索将喀斯特石漠化地区渗漏的难利用蓝水转化为可供植被生长利用的生态绿水,对类似地区提高水资源利用量的研究,将具有一定的参考意义。

3.4 蓝水绿水转化效果对比分析

此前的模型计算结果显示,增加植被盖度和增厚土层均能实现将喀斯特石漠化地区渗漏的难利用蓝水转化为生态绿水,但哪一种方法转化效果更明显,尚需进一步比较分析。为此,假定降水量不变,将两种方法对转化绿水的贡献数值列表见表 7,为便于比较,对增厚土层的模拟,增加了 45 cm 和 55 cm 两种土壤厚度。

参考文献(References):

[1] GUO F,JIANG G,YUAN D et al. ,Evolution of major environmental geological problems in Karst areas of southwestern China[J]. Environmental Earth Sciences, 2013, 69 (7): 2427-2435. DOI: 10. 1007/s12665-012-2070-8.

[2] BALLESTEROS D, MALARD A, JEANNIN P et al. KARSYS hydrogeological 3D modeling of alpine Karst aquifers developed in geologically complex areas; Picos de Europa National Park (Spain) [J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74 (12): 7699-7714. DOI: 10. 1007/s12665-015-4712-0.

[3] 张军以,王腊春,马小雪等. 西南岩溶地区地下水污染及防治途径[J]. 水土保持通报, 2014(2): 245-249. (ZHANG J Y, WANG L C, MA X X, et al. Groundwater pollution and controlling measures in Karst mountainous areas of southwestern China[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014(2): 245-249. (in Chinese)) DOI:10. 13961/j. cnki. stbctb. 2014. 02. 051.

[4] QIN X,JIANG Z. Situation and comprehensive treatment strategy of drought in Karst mountain areas of southwest China[Z]. Springer, 2011: 383-389. DOI:10. 1007/978-3-642-19902-8_45.

[5] PARISE M, CLOSSON D, GUTIERREZ F et al. , Anticipating and managing engineering problems in the complex Karst environment [J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74 (12): 7823-7835. DOI: 10. 1007/s12665-015-4647-5.

- [6] QIN L, BAI X, WANG S, et al. Major problems and solutions on surface water resource utilisation in karst mountainous areas [J]. *Agricultural Water Management*, 2015(159): 55-65. DOI: 10. 1016/j. agwat. 2015. 05. 024.
- [7] 朱生亮, 张建利, 吴克华, 等. 岩溶工程性缺水农村饮用储存水净化方法[J]. *长江科学院院报*, 2013(11): 20-23. (ZHU S L, ZHANG J L, WU K H, et al. Device of purifying storage drinking water in rural karst engineering water shortage area[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2013(11): 20-23. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1001-5485. 2013. 11. 005.
- [8] LU Y, LIU Q, ZHANG F. Environmental characteristics of Karst in China and their effect on engineering [J]. *Carbonates and Evaporites*, 2013, 28(1-2SI): 251-258. DOI: 10. 1007/s13146-013-0158-1.
- [9] 朱文孝, 李坡, 贺卫, 等. 贵州喀斯特山区工程性缺水解决的出路与关键科技问题[J]. *贵州科学*, 2006(1): 1-7. (ZHU W X, LI P, HE W, et al. Solutions and major scientific problems on engineering water shortage in Karst mountain area of Guizhou[J]. *Guizhou Science*, 2006(1): 1-7. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1003-6563. 2006. 01. 001.
- [10] FALKENMARK M. Coping with water scarcity under rapid population growth[C]. *Proceedings of Conference of SADC Ministers*, Pretoria, South Africa, 1995.
- [11] FALKENMARK M, ROCKSTROM J. The new blue and green water paradigm: Breaking new ground for water resources planning and management[J]. *Journal of Water Resources Planning and Management-Asce*, 2006, 132(3): 129-132. DOI: 10. 1061/(ASCE)0733-9496(2006)132:3(129).
- [12] LATHUILLIERE M J, COE M T, JOHNSON M S. A review of green- and blue-water resources and their trade-offs for future agricultural production in the Amazon basin: what could irrigated agriculture mean for Amazonia[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2016, 20(6): 2179-2194. DOI: 10. 5194/hess-20-2179-2016.
- [13] STEWART B A, PETERSON G A. Managing green water in dryland agriculture[J]. *Agronomy Journal*, 2015, 107(4): 1544-1553. DOI: 10. 5194/hess-2016-71.
- [14] HUANG Q, CAI Y, XING X. Rocky Desertification, antidesertification, and sustainable development in the Karst mountain region of southwest China[J]. *Ambio: A Journal of the Human Environment*, 2008, 37(5): 390-392. DOI: 10. 1579/08-s-493. 1.
- [15] 杨胜天, 宋叙言, 徐明峰, 等. 扶贫攻坚 V4. 0 版: 贵州省台江县脱贫致富的智力“流”模式[J]. *贵州师范大学学报(自然科学版)*, 2018, 36(4): 7-12. (YANG S T, SONG S Y, XU M F, et al. .4. 0 Version of poverty alleviation: Study on intelligent“flow”of poverty alleviation in Taijiang County[J]. *Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences)*, 2018, 36(4): 7-12. (in Chinese)) DOI: 10. 16614 /j. gznuz. zrb. 2018. 04. 002.
- [16] YUAN D. On the karst ecosystem[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2001, 75(3): 336-338. DOI: 10. 1111/j. 1755-6724. 2001. tb00541. x.
- [17] 万军, 蔡运龙. 喀斯特生态脆弱区的土地退化及生态重建: 以贵州省关岭县为例[J]. *中国人口. 资源与环境*, 2003(2): 55-59. (WAN J, CAI Y L. Land degradation and eco-reconstruction in fragile Karst ecosystem: The case of Guanling County, Guizhou[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2003(2): 55-59. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1002-2104. 2003. 02. 011.
- [18] 杜睿, 周宇光, 王庚辰, 等. 土壤水分对温带典型草地 N₂O 排放过程的影响[J]. *自然科学进展*, 2003(9): 45-51. (DU R, ZHOU Y G, WANG G C, et al. . Effects of soil moisture on N₂O emission from temperate typical grassland[J]. *Natural science progress*, 2003(9): 45-51. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 1002-008X. 2003. 09. 008.
- [19] 王志强, 刘宝元, 王晓兰. 黄土高原半干旱区天然锦鸡儿灌丛对土壤水分的影响[J]. *地理研究*, 2005(1): 113-120. (WANG Z Q, LIU B Y, WANG X L. Effects of natural caragana shrubs on soil moisture in semi-arid region of the Loess Plateau[J]. *Geographic Research*, 2005(1): 113-120. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 1000-0585. 2005. 01. 013.
- [20] 王玉娟, 杜迪, 杨胜天, 等. 贵州龙里典型喀斯特地区绿水资源耗用研究[J]. *中国岩溶*, 2008(4): 340-346. (WANG Y J, DU D, YANG S T, et al. . Study on the consumption of green water resources in the typical Karst area of Longli, Guizhou[J]. *Chinese Karst*, 2008(4): 340-346. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1001-4810. 2008. 04. 008.
- [21] 温志群, 杨胜天, 宋文龙, 等. 典型喀斯特植被类型条件下绿水循环过程数值模拟[J]. *地理研究*, 2010(10): 1841-1852. (WEN Z Q, YANG S T, SONG W L, et al. The numerical simulation on green water cycle of typical vegetation types in Karst area[J]. *Geographical Research*, 2010(10): 1841-1852. (in Chinese)) DOI: 10. 11821/yj2010100012.
- [22] 杨胜天. 喀斯特地区绿水利用研究[M]. 北京: 科学出

- 版社,2014,100-106. (YANG S T. Study on the utilization of green water in Karst area[M]. Beijing: Science Press,2014,100-106. (in Chinese))
- [23] GAO X, PENG S, WANG W, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of reference evapotranspiration trends in Karst area; A case study in Guizhou Province, China[J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2016, 128(5): 677-688. DOI: 10. 1007/s00703-016-0442-4.
- [24] 王桂萍, 韩堂松, 朱华, 等. 贵阳地区石漠化植被恢复造林树种的筛选[J]. *林业科技*, 2012(4): 37-41. (WANG G P, HAN T S, ZHU H, et al. Study on afforestation tree species selection for rocky desertification vegetation restoration in Guiyang[J]. *Forestry Science & Technology*, 2012(4): 37-41. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1001-9499. 2012. 04. 014.
- [25] LIU Y, HUANG X, YANG H, et al. Environmental effects of land-use/cover change caused by urbanization and policies in southwest China Karst area: A case study of Guiyang[J]. *Habitat International*, 2014, 44: 339-348. DOI: 10. 1016/j. habitatint. 2014. 07. 009.
- [26] WANG S J, LIU Q M, ZHANG D F. Karst rocky desertification in southwestern China: Geomorphology, landuse, impact and rehabilitation[J]. *Land Degradation & Development*, 2004, 15(2): 115-121. DOI: 10. 1002/ldr. 592.
- [27] YANG P, TANG Y, ZHOU N, et al. Characteristics of red clay creep in karst caves and loss leakage of soil in the karst rocky desertification area of Puding County, Guizhou, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 63(3): 543-549. DOI: 10. 1007/s12665-010-0721-1.
- [28] KANG S Z, ZHANG F C, ZHANG J H. A simulation model of water dynamics in winter wheat field and its application in a semiarid region[J]. *Agricultural Water Management*, 2001, 49(2): 115-129. DOI: 10. 1016/S0378-3774(00)00137-2.
- [29] KONRAD W, ROTH-NEBELSICK A. Integrating plant gas exchange, soil, and hydrological parameters in an Analytical model: Potential use and limitations[J]. *Vadose Zone Journal*, 2011, 10(4): 1196-1204. DOI: 10. 2136/vzj2010. 0157.
- [30] 王玉娟, 杜迪, 杨胜天, 等. 贵州龙里典型喀斯特地区绿水资源耗用研究[J]. *中国岩溶*, 2008(4): 340-346. (WANG Y J, DU D, YANG S T, et al. Consumption of green water resources in typical Karst area: A case study in Longli, Guizhou[J]. *Carsologica Sinica*, 2008(04): 340-346. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1001-4810. 2008. 04. 008.
- [31] 杨胜天. 遥感水文数字实验: EcoHAT 使用手册[M]. 北京: 科学出版社, 2015. (YANG S T. Digital experiment for remote sensing application in hydrology- EcoHAT Handbook[M]. Beijing: Science Press, 2015 (in Chinese))
- [32] BARELLA-ORTIZ A, POLCHER J, TUZET A, et al. Potential evaporation estimation through an unstressed surface-energy balance and its sensitivity to climate change[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013, 17(11): 4625-4639. DOI: 10. 5194/hess-17-4625-2013.
- [33] CLULOW A D, EVERSON C S, MENGISTU M G, et al. Extending periodic eddy covariance latent heat fluxes through tree sap-flow measurements to estimate long-term total evaporation in a peat swamp forest[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2015, 19(5): 2513-2534. DOI: 10. 5194/hess-19-2513-2015.
- [34] MA N, ZHANG Y, SZILAGYI J, et al. Evaluating the complementary relationship of evapotranspiration in the alpine steppe of the Tibetan Plateau[J]. *Water Resources Research*, 2015, 51(2): 1069-1083. DOI: 10. 1002/2014WR015493.
- [35] PRIESTLEY C, TAYLOR R J. Assessment of surface heat-flux and evaporation using large-scale parameters[J]. *Monthly Weather Review*, 1972, 100(2): 81. DOI: 10. 1175/1520-0493(1972)100%3C0081: OTAOSH%3E2. 3.CO;2.
- [36] 赵玲玲, 王中根, 夏军, 等. Priestley-Taylor 公式的改进及其在互补蒸散模型中的应用[J]. *地理科学进展*, 2011(7): 805-810. (ZHAO L L, WANG Z G, et al. Improved Priestley-Taylor method and its application in complementary relationship evapotranspiration model[J]. *Progress in Geography*, 2011(7): 805-810. (in Chinese)) DOI: 10. 11820/dlxxjz. 2011. 07. 004.
- [37] RITCHIE J T, HANKS J. Modeling plant and soil systems[J]. *Modeling Plant and Soil Systems*, 1991. DOI: 10. 2134/agronmonogr31.
- [38] ASTON A R. Rainfall interception by eight small trees[J]. *Journal of Hydrology*, 1979, 42(3): 383-396. DOI: 10. 1016/0022-1694(79)90057-X.
- [39] KERKIDES P, KARGAS G, ARGYROKASTRITIS I. The effect of different methods used for hysteretic K(H) determination on the infiltration simulations[J]. *Irrigation and Drainage*, 2006, 55(4): 403-418. DOI: 10. 1002/ird. 266.
- [40] 李保国. 农田土壤水的动态模型及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2000. (LI B G. Dynamic model and application of farmland soil water[J]. Beijing: Science Press,

- 2015 (in Chinese))
- [41] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44 (5): 892-898. DOI: 10. 2136/sssaj1980. 03615995004400050002x.
- [42] 吴擎龙,雷志栋,杨诗秀. 压力入渗仪测定导水率的理论及其应用[J]. 水利学报, 1996(2): 56-62. (WU Q L, LEI Z D, YANG S X. Theory and application of pressure infiltration instrument for measuring hydraulic conductivity[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1996(2): 56-62. (in Chinese)) DOI:10. 13243/j. cnki. slxb. 1996. 02. 009.
- [43] VEREecken H, MAES J, FEYEN J, et al. Estimating the soil moisture retention characteristic from texture, Bulk Density, and Carbon Content[J]. Soil Science, 1989, 148 (6): 389-403. DOI: 10. 1097/00010694-198912000-00001.
- [44] 吴擎龙. 田间腾发条件下水热迁移数值模拟的研究[D]. 北京: 清华大学, 1993. (WU Q L. Numerical simulation of hydrothermal migration under field transpiration and evaporation conditions[D]. Beijing: Tsinghua University, 1993(in Chinese))
- [45] 张喜, 薛建辉, 生原喜久雄, 等. 黔中山地喀斯特森林的水文学过程和养分动态[J]. 植物生态学报, 2007(5): 757-768. (ZHANG X, XUE J H, HIROHIRO INOBUCHI, et al. Distributed hydrological model and eco-hydrological effect of vegetation in Karst watershed[J]. Advances in Water Science, 2007(5): 757-768. (in Chinese)) DOI:10. 17521/cjpe. 2007. 0097.
- [46] 张志才, 陈喜, 石朋, 等. 喀斯特流域分布式水文模型及植被生态水文效应[J]. 水科学进展, 2009(6): 806-811. (ZHANG Z C, CHEN X, SHI P, et al. Distributed hydrological model and eco-hydrological effect of vegetation in Karst watershed[J]. Advances in Water Science, 2009(6): 806-811. (in Chinese)) DOI: 10. 14042/j. cnki. 32. 1309. 2009. 06. 003.
- [47] TENNANT D L. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources[J]. Fisheries, 1976, 1 (4): 6-10. DOI: 10. 1577/1548-8446 (1976) 001% 3C0006; IFRFFW% 3E2. 0. CO; 2.

(上接第 145 页)

- [24] 何振奇, 乔光建. 基于多项式回归模型的枯季径流预报与分析[J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(5) 85-88. (HE Z Q, QIAO G J. Polynomial regressin model based on the low flow forecasting and analysis[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8 (5): 85-88. (in Chinese)) DOI:10. 3969/SP. J. 1201. 2010. 05085.
- [25] 葛朝霞, 薛梅, 宋颖玲. 多因子逐步回归周期分析在中长期水文预报中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2009, 37(3): 255-257. (GE Z X, X M, SONG Y L. Application of multi-factor stepwise regression cycle analysis in medium and long-term hydrological forecast[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2009, 37(3): 255-257. (in Chinese)) DOI:10. 3876/j. issn. 1000-1980. 2009. 03. 002.
- [26] 刘冬英, 沈燕舟, 王政祥. 怒江流域水资源特性分析[J]. 人民长江, 2008, 39(17): 64-66. (LIU D Y, SHEN Y Z, WANG Z X. Analysis of water resources characteristics of the Nujiang River basin[J]. Yangtze River, 2008, 39(17): 64-66. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1001-4179. 2008. 17. 022.