

文章编号: 1008-2786-(2020)6-816-13

DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000558

基于生态系统质量的水源涵养服务评估 ——以西南五省为例

沈钰仟^{1,2}, 肖 燚^{1*}, 欧阳志云¹, 张 平³

(1. 中国科学院生态环境研究中心 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085;

2. 中国科学院大学 资源与环境学院, 北京 100049; 3. 西安工程大学 环境与化学工程学院, 西安 710048)

摘 要: 水源涵养服务评估是生态系统服务评估的重要内容之一。水量平衡法是水源涵养模拟评估常用的方法之一, 然而以往的多数研究由于没有考虑到生态系统质量差异对水源涵养服务带来的影响, 在一定程度上影响了水源涵养服务评估的精度。本研究以西南五省为例, 基于水量平衡原理, 使用不考虑生态系统质量的水量平衡法、基于叶面积指数的水量平衡法、基于生物量与植被覆盖度的水量平衡法, 进行了水源涵养服务的评估精度的比较研究。通过对比较验证三种考虑不同生态系统质量参数的方法与水文实测数据的结果发现: 三组数据配对 t 检验差异显著性结果均为 $P > 0.05$, 三组结果均无显著性差异; 基于生物量与植被覆盖度的水量平衡法评估结果与实测结果相关系数最高, 为 0.982 ($P < 0.001$), 说明三种方法中, 基于生物量与植被覆盖度的水量平衡法更能准确地反映出当地生态系统的水源涵养服务功能, 其次为基于叶面积指数的水量平衡法, 不考虑质量参数的水量平衡法评估结果与实测结果相关性最低。研究结果可为未来基于不同研究目的的水源涵养评估方法提供参考, 并为水源涵养服务评估体系的优化提供思路。

关键词: 水源涵养服务; 水源涵养量; 生物量; 植被覆盖度; 西南五省

中图分类号: Q148

文献标志码: A

水源涵养服务^[1-3]是指自然生态系统(如森林、灌丛、草地等)通过植被冠层、枯落物层、土壤层对降水进行再分配, 从而有效涵养水分和调节径流^[4-5]。水源涵养服务评估方法主要包括土壤蓄水能力法、综合蓄水能力法、降水储存量法、水量平衡法、多因子回归法等, 可分为两大类: 野外试验测定法^[6-8]和模型模拟法^[9-11]。目前国内外研究中, 基于模型模拟法对水源涵养服务的评估大多只考虑了降水量、蒸散发和土地利用/覆盖类型的影响^[10, 12-14], 而基于实地测验的结果证明, 生态系统质量也是影响水源涵养服务的重要因素, 如: 生物量越大, 地表径流

系数越小^[15-20]; 植被覆盖度、叶面积指数增加导致径流量减少^[6, 20-24]; NPP 的增加促进土壤保水量提高^[25-26]; 不同林型、林龄、林分起源造成生态系统水源涵养能力的差异^[18, 27-31]。对于小尺度范围内的水源涵养服务评估, 可以通过实地测验, 使用精度更高的数据模型来计算, 而在较大尺度上, 由于获取实测数据的工作量及难度较大, 野外试验测定法的可行性不高, 需要通过模型模拟来评估研究区内的水源涵养服务。水量平衡法是国内外常用的水源涵养模拟评估方法, 虽然它考虑了降雨、蒸散和不同生态系统径流特征的影响^[9-11], 但降雨和蒸散并不能体现生态

收稿日期(Received date): 2020-08-18; 改回日期(Accepted date): 2020-12-20

基金项目(Foundation item): 国家重点研发计划(2016YFC0502102)。[National Key Research and Development Project(2016YFC0502102)]

作者简介(Biography): 沈钰仟(1996-), 女, 湖南常德人, 硕士研究生, 主要研究方向: 生态系统服务评估。[SHEN Yuqian(1996-), female, born in Changde, Hunan province, M.Sc.candidate, research on assessment of ecosystem services] E-mail: shenyuqian0521@126.com

* 通讯作者(Corresponding author): 肖燚(1972-), 女, 副研究员, 主要研究方向: 生态系统评估及信息系统开发。[XIAO Yi(1972-), female, associate researcher, specialized in ecosystem assessment and information system development] E-mail: xiaoyi@cees.ac.cn

2 数据来源

降雨量、潜在蒸散发量、土地覆盖/分类、土壤数据等数据来源参见表 1。

3 研究方法

本研究基于水量平衡原理使用三种不同形式的评估方法:不考虑质量的水量平衡法、基于叶面积指

数的水量平衡法(使用 InVEST 模型产水量模块计算)、基于生物量与植被覆盖度的水量平衡法对中国西南地区进行了水源涵养服务评估(表 2)。其中,不考虑质量的水量平衡法^[33]主要涉及了降水量、蒸散发量、地表径流量和生态系统类型 4 个因素,该方法未考虑生态系统质量参数的影响;基于叶面积指数的水量平衡法^[11]考虑了叶面积指数(LAI)^[34]对水源涵养服务的影响;基于生物量与植被覆盖度的水量平衡法^[35]综合考虑了生物量^[18-19]和植被覆盖度^[23, 36]变化带来的水源涵养服务的差异。

表 1 数据来源

Tab. 1 Data sources

数据	来源
降雨量	中国气象局提供的 1961 年到 2012 年降水资料,通过 Kriging 插值法(Ordinary Kriging)进行空间内插,并与中科院地理所提供的 50 年平均降雨量进行平均值取值得到(精度 1000 m)。
潜在蒸散发量	潜在蒸散发数据来源于 InVEST 模型用户使用说明手册推荐的 CGIAR 网站(https://cg iarcsi. community/data/global-aridity-and-pet-database/)。
土地覆盖/分类	使用中国科学院遥感与数字地球研究所提供的土地覆盖/分类数据(China Cover,30 m,2000 年)。
行政区划	中国科学院地理科学与资源研究所提供的最新省级、县级行政区划(2011 年)。
土壤数据	第二次全国土壤调查南京土壤所提供的 1:100 万土壤数据,所需土壤数据分别为不同土壤质地类型的含量、容量及土壤深度。
地形指数	根据土壤深度、百分比坡度和汇水面积计算获得。
土壤饱和和导水率	基于土壤粘粒、粉粒、粗砂含量用 Neuro Theta 软件预测出土壤饱和和导水率。
流域	中国科学院地理科学与资源研究所提供的西南地区二级流域和西南诸河三级流域。
蒸散发	对中科院地理所提供的蒸散发站点数据通过 Kriging 插值法(Ordinary Kriging)进行空间内插,再与遥感所提供的蒸散发数据进行平均值取值得到(精度 1000 m)。
地表径流	地表径流系数通过查阅 306 篇(201 篇中文、105 篇英文)文献资料获得。
叶面积指数	中国科学院遥感与数字地球研究所提供的植被覆盖度数据(2000 年,250 m)。
植被覆盖度	中国科学院遥感与数字地球研究所提供的植被覆盖度数据(2000 年,250 m)。
生物量	2000 年生物量数据,分辨率为 1000 m。

表 2 不同评估方法计算公式对比

Tab. 2 Comparison of calculation formulas of different evaluation methods

方法名称	计算公式	备注
不考虑质量的 水量平衡法	$Q = P - AET - R$	Q 为水源涵养量(mm); P 为降雨量(mm); AET 为蒸散发(mm); R 为地表径流量(mm)。
基于叶面积 指数的水量 平衡法	$Y = P - AET$ $Q = \min(1, \frac{249}{V}) \times \min(1, 0.9 \times \frac{TI}{3}) \times \min(1, \frac{K}{300}) \times Y$ $K_c = \begin{cases} \frac{LAI}{3}, LAI \leq 3 \\ 1, LAI > 3 \end{cases}$	Y 为年产水量(mm); Q 为水源涵养量(mm); V 为流速系数; TI 为地形指数,无量纲; K 为土壤饱和和导水率(cm/d); K_c 为蒸散系数; LAI 为叶面积指数。
基于生物量与 植被覆盖度的 水量平衡法	$Q = F_c \times (P - AET - R)$ $F_c = \begin{cases} \frac{AGB_x}{AGB_c} \times \frac{VC_x}{VC_c}, c \text{ 为林灌园农绿}^* \\ \frac{VC_x}{VC_c}, c \text{ 为草地} \end{cases}$	Q 为水源涵养量(m^3); F_c 为修正系数,无量纲; AGB_x 和 VC_x 分别为栅格单元 x 的生物量($gC \cdot m^{-2}$)和盖度(%); AGB_c 和 VC_c 分别为 c 类一级生态系统的平均生物量($gC \cdot m^{-2}$)和平均盖度(%); VC_c 为 c 类一级生态系统的平均盖度(%)。

注:* 林灌园农绿分别指:森林、灌丛、园地、农田、城市绿地。

4 结果与分析

4.1 模拟结果验证

4.1.1 产水量模型验证

根据《水资源公报》,2003—2005 年西南五省水资源总量(扣除地下水资源与地表水资源重复计算量)分别为 $7.67 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 、 $7.69 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 、 $7.83 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 。本文基于 InVEST 模型产水量模块模拟结果分别为 $7.41 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 、 $8.19 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 、 $8.04 \times 10^{11} \text{ m}^3$;将模拟结果分别与水资源总量进行比较,相对误差分别控制在 3.39%、6.1%、2.61%。根据图 2 可知,产水量结果与水资源公报结果回归方程为 $y = 0.8771x + 220.18$, R^2 为 0.9688,可见回归模型的拟合效果较好,产水量得到较好模拟,参数设置基本可行。

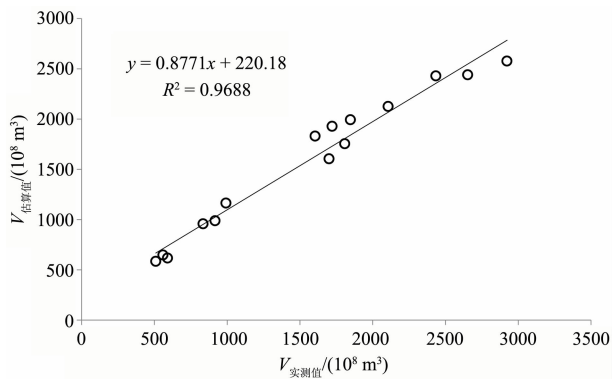


图 2 产水量结果验证

Fig. 2 Verification of water yield simulations

4.1.2 水源涵养结果验证

水源涵养结果的验证首先通过查询文献,获得研究区内不同水系的水文实测径流数据以及降雨量和蒸散发^[37-39]数据,然后计算得到各水系水文记录点的水源涵养深度。计算结果参见表 3、图 3。

表 3 水源涵养深度验证对比

Tab. 3 Comparison of data validation for water conservation capacity
单位:mm

水系	实测	不考虑质量的水量平衡法	基于叶面积指数的水量平衡法	基于生物量与植被覆盖度的水量平衡法
元江	355.14	303.38	283.25	350.03
大渡河	269.00	315.08	243.00	266.20
直门达至石鼓	160.77	199.95	158.02	174.79
赤水河	322.92	244.65	274.91	311.49
雅砻江	248.43	287.89	242.73	245.17
北盘江	344.70	371.02	325.40	342.97
南盘江	263.72	294.10	248.32	292.15

将计算所得实测结果与三种评估方法模拟所得结果进行配对 T 检验,三组数据差异显著性结果均为 $P > 0.05$,说明三种模拟方法与实测结果之间均无显著性差异,评估结果能够较好地模拟研究区的水源涵养服务功能。基于生物量与植被覆盖度的水量平衡法评估结果与实测结果相关系数最高,为 0.982 ($P < 0.001$),达到了统计学显著性水平。结果显示:对比三种方法,基于生物量与植被覆盖度的水量平衡法相对来说能够更真实的反映出研究区的

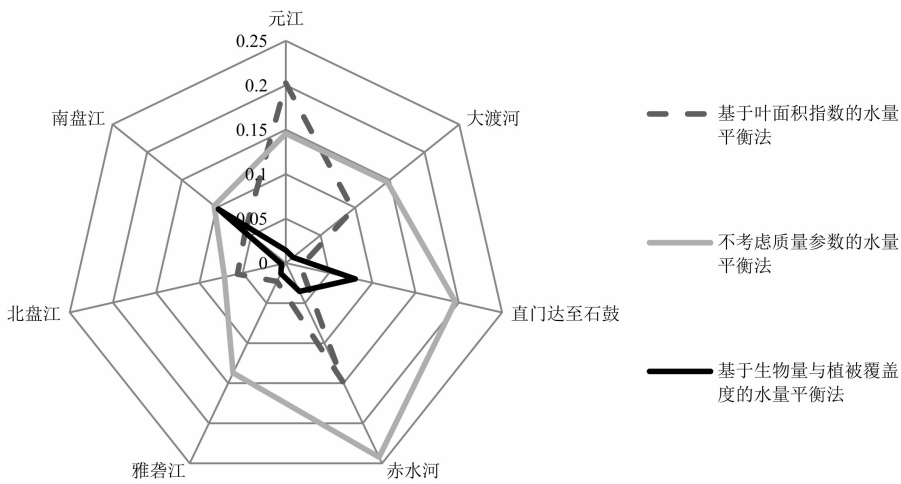


图 3 不同方法与实测结果差值比例

Fig. 3 Difference ratio between different methods and actual measurement results

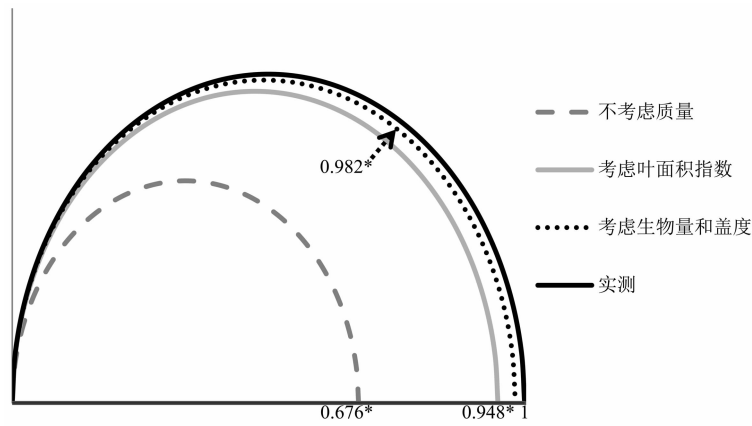
水源涵养能力。此外,根据图 4 的检验结果,综合考虑生物量与植被覆盖度时评估结果与西南地区实测结果相关性最高,其次为仅考虑叶面积指数的评估结果,不考虑任何质量因素时其结果与实测结果相关性最低。

将计算结果与同研究区内实地测量的评估结果^[40-42]对比(图 5)可知,基于生物量与植被覆盖度的水量平衡法得到的森林生态系统单位面积水源涵养量由大到小排序为:常绿阔叶林>针阔混交林>常绿针叶林>落叶阔叶林>落叶针叶林>稀疏林;基于叶面积指数的水量平衡法为:常绿阔叶林>针阔混交林>落叶针叶林>落叶阔叶林>常绿针叶林>稀疏林;不考虑质量的水量平衡法为:针阔混交林

>常绿阔叶林>落叶针叶林>落叶阔叶林>常绿针叶林>稀疏林。这可能是由于阔叶林不仅林冠层能对降雨产生截留作用,且其枯落物较多,分解速率相对较快^[40],使得土壤渗透性能较好,具有较强的蓄水能力,能够有效减少地表径流量,起到对降水再分配、涵养水分和调节径流的作用;而针叶林的林冠层虽然也有一定的截留能力,但由于其枯落物分解较慢,导致土壤非毛管孔隙度小,土壤对水分的渗透能力相对较弱^[41-42],所以一般来说,阔叶林水源涵养能力最大。由此可见,考虑生物量与植被覆盖度因子时水源涵养评估结果相对更准确。

4.2 结果分析对比

基于水量平衡原理利用三种不同方法评估西南



注: * 表示在 0.001 水平上显著。

图 4 配对 T 检验样本相关系数

Fig. 4 Paired samples correlations of Paired t test

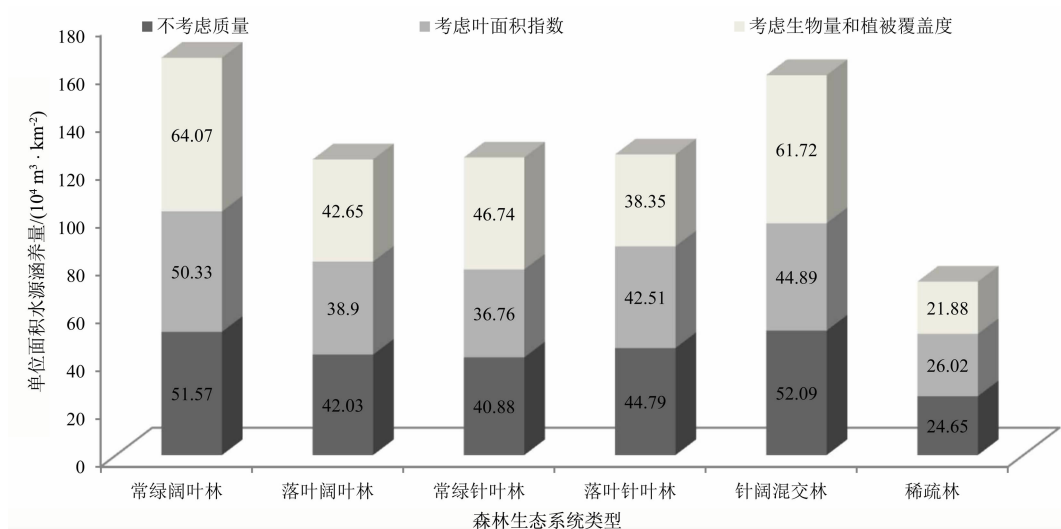


图 5 森林生态系统单位面积水源涵养量

Fig. 5 Per unit area of water conservation in forest ecosystems

地区水源涵养服务,计算结果如表 4。结果显示:三种方法计算得到的水源涵养总量由大到小分别为: $4.736 \times 10^{11} \text{ m}^3$ (基于生物量与植被覆盖度的水量平衡法) $> 4.399 \times 10^{11} \text{ m}^3$ (基于叶面积指数的水量平衡法) $> 4.37 \times 10^{11} \text{ m}^3$ (不考虑质量的水量平衡法)。此外,将两种基于生态系统质量的评估方法进行比较,以分析考虑叶面积指数因子和考虑生物量与植被覆盖度因子时水源涵养服务评估的差异(图 6)。

4.2.1 水源涵养能力对比

基于叶面积指数的水量平衡法和基于生物量与植被覆盖度的水量平衡法均通过不同参数反映了生态系统质量对水源涵养服务产生的影响。其中,基于叶面积指数的水量平衡法考虑了叶面积指数变化带来的影响;而基于生物量与植被覆盖度的水量平衡法使用植被覆盖度对草地生态系统进行了修正,并使用生物量和植被覆盖度对其他生态系统(森林、灌丛、园地、农田、城市绿地)进行了修正。

由于叶面积指数一定程度上反映了植被覆盖度,因此二者对于草地生态系统质量的模拟比较相似。对比两种方法的评估结果可发现,草地生态系统单位面积的水源涵养量相对接近(图 7)。对于草地生态系统,叶面积指数可以反映出其质量的变化^[20, 43],但对于森林、灌丛这类生态系统结构层次相对复杂、生物多样性比较丰富的生态系统类型来说,仅用叶面积指数则不能很好的体现出生态系统质量的变化^[24, 44]。如杞金华等在 2013 年探讨了 2010 年初西南干旱对当地原生植被林冠和凋落物量的影响,结果表明:西南特大干旱使常绿阔叶林森林凋落物组分叶的旱季凋落量增大,但并不影响乔灌木层的叶面积指数^[24]。因此,仅考虑叶面积指数还不足以反映各类生态系统的质量变化,因此对于复杂生态系统需要基于生物量和植被覆盖度进行水源涵养评估。

两种基于生态系统质量的评估方法对水源涵养服务的刻画精度相对较高,但其计算过程中仍存在一些不足:InVEST 模型中湿地生态系统单位面积水源涵养量相对偏低,可能是由于产水量模块在计算过程中仅考虑了降雨和蒸散发的影响,不考虑地表水和地下水的相互作用及流域水分补给的时间因

表 4 生态系统单位面积水源涵养量

Tab. 4 Per unit area of water conservation in ecosystems

单位: $10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$

生态系统类型	不考虑质量的水量平衡法	基于叶面积指数的水量平衡法	基于生物量与植被覆盖度的水量平衡法
常绿阔叶林	51.57	50.33	64.07
落叶阔叶林	42.03	38.90	42.65
常绿针叶林	40.88	36.76	46.74
落叶针叶林	44.79	42.51	38.35
针阔混交林	52.09	44.89	61.72
常绿阔叶灌丛	41.32	41.75	49.59
落叶阔叶灌丛	33.22	37.73	33.57
常绿针叶灌丛	37.71	38.75	38.63
稀疏林	24.65	26.02	21.88
稀疏灌丛	28.12	28.21	27.05
乔木园地	39.65	25.16	46.97
灌木园地	47.56	18.25	43.19
乔木绿地	48.43	36.35	84.65
灌木绿地	45.86	43.13	60.75
温性草原	26.31	17.22	18.19
高寒草原	26.44	20.27	19.71
温性草甸	28.21	21.38	21.72
高寒草甸	18.15	18.25	15.00
草丛	35.38	27.66	26.32
稀疏草地	18.10	18.28	10.40
草本绿地	36.67	27.58	12.75
水田	12.84	11.78	12.15
旱地	7.19	9.45	9.08
乔木湿地	61.44	22.18	61.44
灌木湿地	43.68	33.00	43.68
草本湿地	21.18	22.77	21.18
湖泊	55.02	10.45	55.02
水库/坑塘	49.94	7.11	49.94
河流	45.57	5.91	45.57
运河/水渠	41.34	6.58	41.34
裸岩	1.81	9.39	0.89
裸土	2.10	9.91	0.80
沙漠	4.33	6.65	2.20
冰川/永久积雪	0.62	10.43	0.29

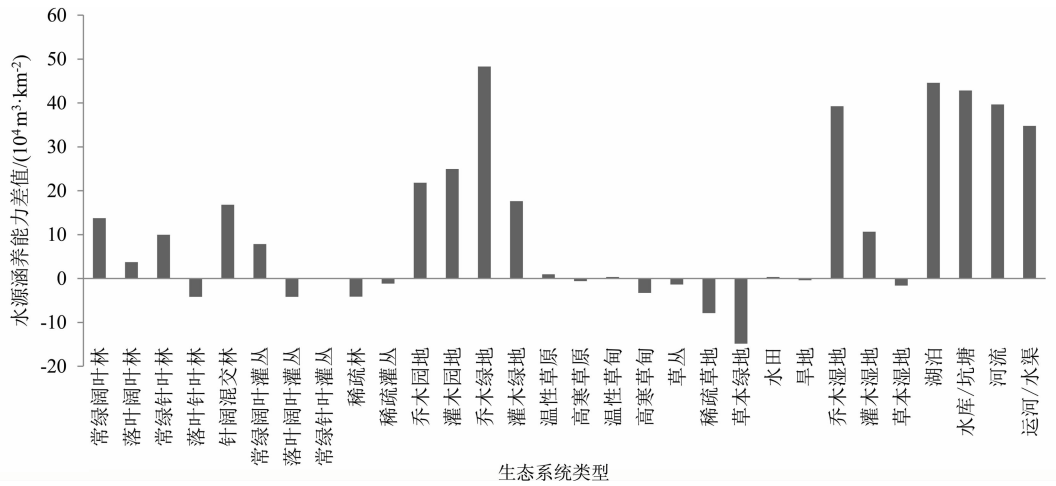


图6 两种方法水源涵养能力差值

Fig. 6 Difference in water conservation capacity between two methods

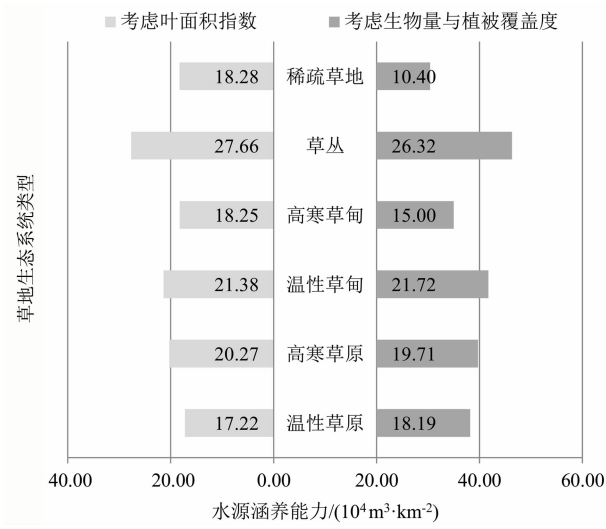


图7 草地生态系统水源涵养能力

Fig. 7 Water conservation capacity of grassland ecosystems

素,而湿地生态系统多年平均蒸散发量较高,若假设生态系统中水分的时空位置不发生改变,不考虑其他流域的水分补给,则会导致湿地生态系统产水量模拟的结果偏低,即使采用地形、土壤因素进行修正,水源涵养量结果也依然偏低。由此可见,该方法对湿地生态系统的水源涵养评估并不准确。此外,由于计算数据中城市绿地主要以混合像元的形式存在,相较于自然生态系统而言,其平均生物量密度和植被覆盖度均较低,而西南地区多为山地、丘陵,其城市各类用地间还留存有少量面积较大的山丘林地等天然绿地,产生了部分生物量极端高值,使得其修正系数也极高,因此导致基于生物量与植被覆盖度的

水量平衡法中乔木绿地和灌木绿地计算结果偏高。

4.2.2 水源涵养空间格局对比

为了进一步比较基于叶面积指数与基于生物量与植被覆盖度的水量平衡法在西南地区水源涵养评估结果的空间分布差异,在上述结果的基础上,用 ArcGIS 对水源涵养总量结果进行自然断点分级(图 9)。基于生物量与植被覆盖度的水量平衡法西南地区水源涵养量总体上呈现南高北低的分布特点,四川盆地及西江水系中的郁江、红水河、柳江流域以农田生态系统为主,人类活动强烈,水源涵养能力低;岷山地区以常绿针叶林兼落叶阔叶灌丛为主,西北边界地区以落叶阔叶灌丛兼高寒草原草甸为主,植被拦蓄水分能力较弱,水源涵养能力低;八十里大南山—越城岭—海洋山一带以及十万大山地区以常绿阔叶林为主,兼有针阔混交林及常绿阔叶灌丛,森林郁闭度高,垂直结构层次完整,水源涵养能力强。基于叶面积指数的水量平衡法评估水源涵养能力在四川盆地、沙鲁里山、云贵高原以及西江水系流域最低;乌江—苗岭一带水源涵养能力一般;十万大山以及八十里大南山—越城岭—海洋山一带区域水源涵养能力最强。

5 讨论

本研究基于水量平衡原理,从不同的生态系统质量角度对西南地区水源涵养服务进行了评估,探究了不同质量参数对水源涵养评估结果的影响,比较了不同方法下模拟结果与实测结果的相关性,分

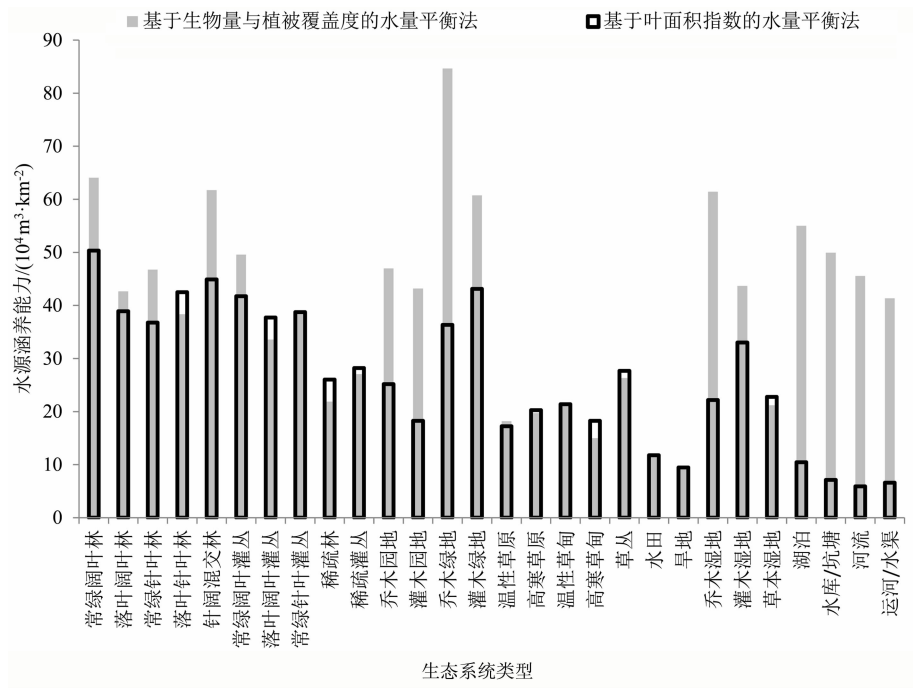
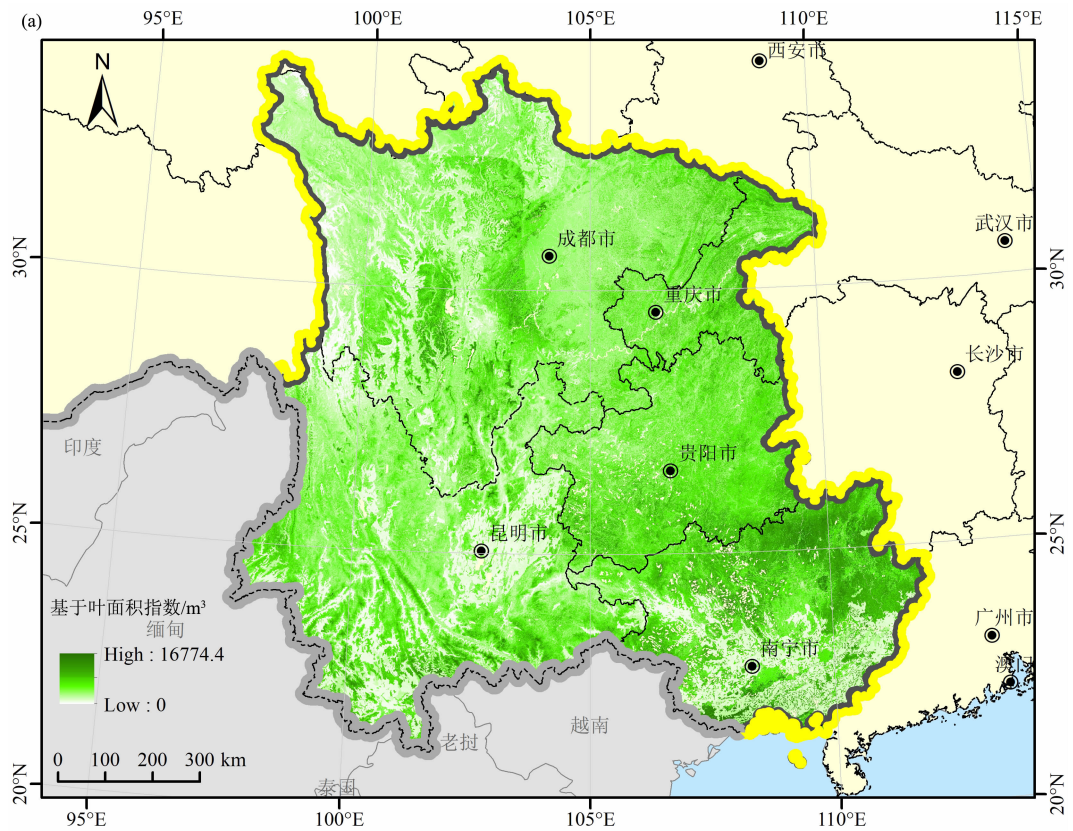


图 8 水源涵养能力对比柱状图

Fig. 8 Histogram comparison of water conservation capacity



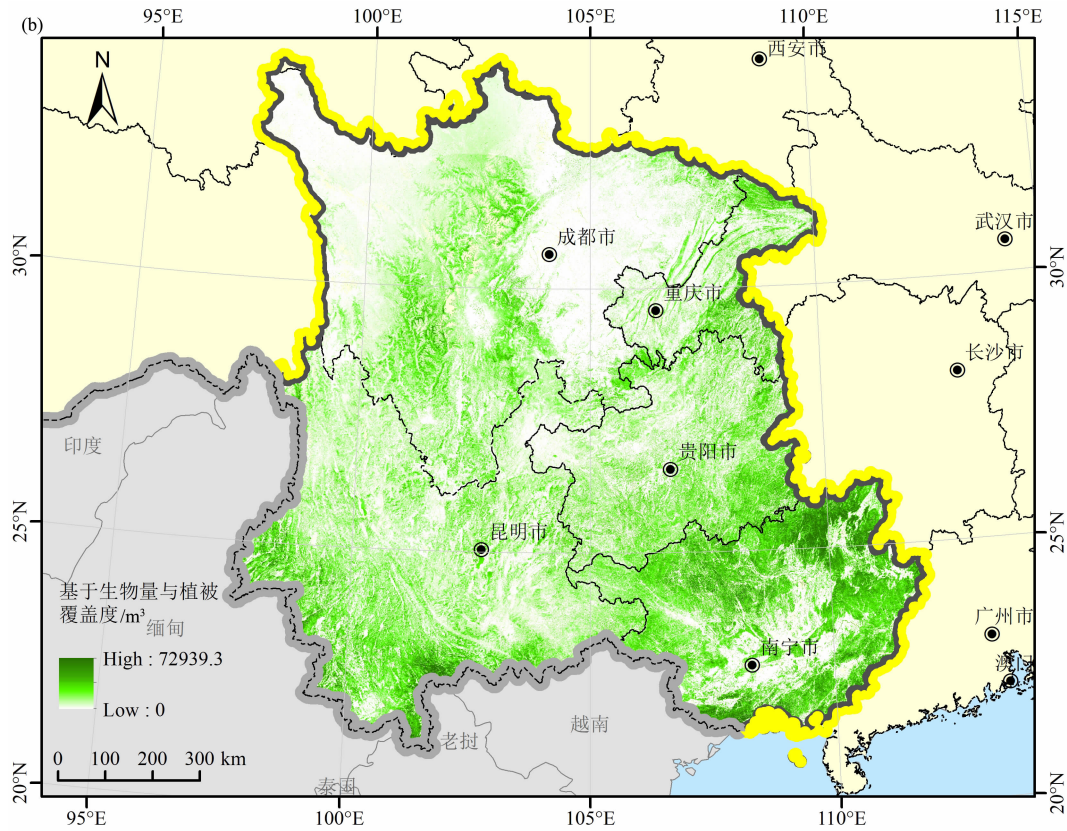


图9 西南地区水源涵养空间格局：

(a) 基于叶面积指数的水量平衡法；(b) 基于生物量与植被覆盖度的水量平衡法

Fig.9 Spatial patterns of water conservation in Southwestern China

(a) water balance method based on biomass and vegetation coverage; (b) water balance method based on leaf area index

析基于生态系统质量的水源涵养服务评估的可行性与准确性。经水源涵养结果验证,三种方法与实测结果的相关性大小排序为:基于生物量与植被覆盖度的水量平衡法 > 基于叶面积指数的水量平衡法 > 不考虑质量的水量平衡法。

从机理上分析,通常水量平衡法对同一种生态系统类型,采用相同的径流系数进行计算,未能很好的体现出同一类生态系统中其质量变化带来的水源涵养服务的差异,相较于其他两种方法来说精度较低。而基于叶面积指数的水量平衡法对草地生态系统不同生态系统质量带来的差异进行了较好的区分,但对于森林、灌丛等相对复杂的生态系统来说,仅用叶面积指数则不能很好地表现出其生态系统质量的变化。基于生物量与植被覆盖度修正的水量平衡法则对各生态系统类型的质量变化考虑得相对全面,对于草地生态系统,利用植被覆盖度反映其生态系统质量的变化;对于森林、灌丛这类结构复杂、物

种多样性丰富的生态系统类型,综合考虑其生物量与植被覆盖度的变化,来反映该生态系统中生态系统质量差异带来的影响。

三种评估方法均存在一定的优缺点。首先,基于生物量与植被覆盖度的水量平衡法对水源涵养服务的评估更准确,比较全面地反映了当地森林、灌丛、草地等生态系统的水源涵养能力,但由于数据中城市绿地主要以混合像元的形式存在,相较于自然生态系统而言,其平均生物量密度和植被覆盖度均较低,而西南地区地貌多为山地、丘陵,其城市用地间还留存有少量面积较大的山丘林地等天然绿地,产生了部分生物量极端高值,使得其修正系数也极高,因此导致基于生物量与植被覆盖度的水量平衡法中乔木绿地和灌木绿地计算结果也偏高。其次,基于叶面积指数的水量平衡法对草地生态系统的水源涵养服务评估结果相对较准确,但对森林、灌丛等结构层次及生物多样性比较丰富的生态系统则未能

较好的体现出其质量的变化。最后,由于 InVEST 模型产水量模块在计算过程中不考虑地表水和地下水的相互作用及流域水分补给的时间因素,而湿地生态系统多年平均蒸散发量较高,若不考虑流域的水分补给,则会导致其产水量结果偏低。虽然文章针对产水量也采用用地形、土壤等因素作为修正系数进行修正,得到的水源涵养结果依然偏低。由此可见,该模型对湿地生态系统的水源涵养服务评估结果并不准确。

本研究尝试对水源涵养服务不同的评估方法进行了对比,为提高水源涵养评估模型的精度提供了方向。在未来水源涵养服务评估相关研究中,可尝试从其他不同地区和尺度进行评估计算,进一步验证本文结论的普遍性,或采用不同类型的生态系统质量参数及其组合对现有模型进行修正,以探索更优化的水源涵养服务评估方法。

6 结论

(1) 基于水量平衡原理利用三种不同方法评估西南地区水源涵养服务,计算得到的水源涵养总量由大到小分别为: $4.736 \times 10^{11} \text{ m}^3$ (基于生物量与植被覆盖度的水量平衡法) $> 4.399 \times 10^{11} \text{ m}^3$ (基于叶面积指数的水量平衡法) $> 4.37 \times 10^{11} \text{ m}^3$ (不考虑质量的水量平衡法);

(2) 经检验,三种方法与实测结果的相关性大小排序为:基于生物量与植被覆盖度的水量平衡法 $>$ 基于叶面积指数的水量平衡法 $>$ 不考虑质量参数的水量平衡法;

(3) 无质量参数的水量平衡法对同种生态系统类型使用相同的径流系数进行计算,未考虑质量,精度较低;基于叶面积指数的水量平衡法用叶面积指数较好的反映了草地生态系统的质量变化,但对于森林、灌丛则显得不够全面;基于生物量与植被覆盖度的水量平衡法对森林、灌丛、草地等生态系统的质量变化刻画得相对较好,精度较高。

参考文献 (References)

[1] 谢高地,肖玉,鲁春霞. 生态系统服务研究:进展、局限和基本范式[J]. 植物生态学报, 2006, **30**(2): 191 - 199. [XIE Gaodi, XIAO Yu, LU Chunxia. Study on Ecosystem Services: Progress, Limitation and Basic Paradigm [J]. Journal of Plant Ecology,

2006, **30**(2): 191 - 199]

- [2] 张玲玲,巩杰,张影. 基于文献计量分析的生态系统服务研究现状及热点[J]. 生态学报, 2016, **36**(18): 5967 - 5977. [ZHANG Lingling, GONG Jie, ZHANG Ying. A review of ecosystem services: a bibliometric analysis based on web of science[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, **36**(18): 5967 - 5977]
- [3] THEVENS N, BECKMANN V, AKIMALIEVA A, et al. Assessment of ecosystem services of the wetlands in the Ili River Delta, Kazakhstan [J]. Environmental Earth Sciences, 2016, **76**(1): 30 - 41.
- [4] RYAN M G, LAVIGNE M B, GOWER S T. Annual Carbon cost of autotrophic respiration in boreal forest ecosystems in relation to species and climate [J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 1997, **102**(D24): 28871 - 28883.
- [5] 温远光,刘世荣. 我国主要森林生态系统类型降水截留规律的数量分析[J]. 林业科学, 1995(4): 289 - 298. [WEN Yuanguang, LIU Shirong. Quantitative analysis of precipitation interception laws of main forest ecosystem types in my country [J]. Scientia Silvae Sinicae, 1995(4): 289 - 298]
- [6] 戴金梅,查轩,黄少燕,等. 不同植被覆盖度对紫色土坡面侵蚀过程的影响[J]. 水土保持学报, 2017, **31**(3): 33 - 38. [DAI Jinmei, ZHA Xuan, HUANG Shaoyan, et al. Effects of slope gradients on erosion under different vegetation coverage on purple slopes[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, **31**(3): 33 - 38]
- [7] 朱志芳,龚固堂,陈俊华,等. 基于水源涵养的流域适宜森林覆盖率研究——以平通河流域(平武段)为例. 生态学报[J], 2011, **31**(6): 1662 - 1668. [ZHU Zhifang, GONG Gutang, CHEN Junhua, et al. Research on suitable forest coverage rate of watershed based on water conservation: a case study of Pingtong River Basin (Pingwu Section) [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, **31**(6): 1662 - 1668]
- [8] 柳思勉,田大伦,项文化,等. 间伐强度对人工杉木林地径流的影响[J]. 生态学报, 2015, **35**(17): 5769 - 5775. [LIU Simian, TIAN Dalun, XIANG Wenhua, et al. Effects of thinning intensity on surface runoff of artificial fir forests[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, **35**(17): 5769 - 5775]
- [9] 傅斌,徐佩,王玉宽,等. 都江堰市水源涵养功能空间格局[J]. 生态学报, 2013, **33**(3): 789 - 797. [FU Bin, XU Pei, WANG Yukuan, et al. Spatial pattern of water retention in dujiangyan county[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, **33**(3): 789 - 797]
- [10] 龚诗涵,肖洋,郑华,等. 中国生态系统水源涵养空间特征及其影响因素[J]. 生态学报, 2017, **37**(7): 2455 - 2462. [GONG Shihan, XIAO Yang, ZHENG Hua, et al. Spatial patterns of ecosystem water conservation in China and its impact factors analysis[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, **37**(7): 2455 - 2462]
- [11] 余新晓,周彬,吕锡芝,等. 基于 InVEST 模型的北京山区森林水源涵养功能评估[J]. 林业科学, 2012, **48**(10): 1 - 5. [YU Xinxiao, ZHOU Bin, LYU Xizhi, et al. Evaluation of water

- conservation function in mountain forest areas of Beijing based on InVEST model[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2012, **48**(10): 1 – 5]
- [12] 李士美, 谢高地. 草甸生态系统水源涵养服务功能的时空异质性[J]. *中国草地学报*, 2015, **37**(2): 88 – 93. [LI Shimei, XIE Gaodi. Spatial and temporal heterogeneity of water conservation service for meadow ecosystem[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2015, **37**(2): 88 – 93]
- [13] 郝弟, 张淑荣, 丁爱中, 等. 河流生态系统服务功能研究进展[J]. *南水北调与水利科技*, 2012, **10**(1): 106 – 111. [HAO Di, ZHANG Shurong, DING Aizhong, et al. Research progress on service functions of river ecosystem[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2012, **10**(1): 106 – 111]
- [14] 余新晓, 张晓明, 武思宏, 等. 黄土区林草植被与降水对坡面径流和侵蚀产沙的影响[J]. *山地学报*, 2006, **24**(1): 19 – 26. [YU Xinxiao, ZHANG Xiaoming, WU Sihong, et al. The effect of vegetation and precipitation upon runoff and sediment production in sloping lands of loess area[J]. *Journal of Mountain Science*, 2006, **24**(1): 19 – 26]
- [15] 林仲. 不同坡位 50 年生木荷人工林水源涵养能力分析[J]. *安徽农业科学*, 2017, **45**(18): 143 – 145. [LIN Zhong. Analysis of water conservation capacity of 50-year schima superba plantation under different site conditions[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2017, **45**(18): 143 – 145]
- [16] 常玉, 余新晓, 陈丽华, 等. 模拟降雨条件下林下枯落物层减流减沙效应[J]. *北京林业大学学报*, 2014, **36**(3): 69 – 74. [CHANG Yu, YU Xinxiao, CHEN Lihua, et al. Effects of undergrowth litter layer on runoff and sediment reduction under simulated rainfall conditions[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2014, **36**(3): 69 – 74]
- [17] 徐翠. 三江源区高寒草甸退化对土壤水源涵养功能的影响[D]. 北京: 中国环境科学研究院, 2013: 61 – 62. [XU Cui. Effects of alpine meadow degradation on the function of soil water conservation in the source region of Three Rivers[D]. Beijing: Chinese Research Academy of Environmental Sciences, 2013: 61 – 62]
- [18] DUAN Wenjun, REN Hai, FU Shenglei, et al. Community Comparison and Determinant Analysis of Understory Vegetation in Six Plantations in South China[J]. *Restoration Ecology*, 2010, **18**(2): 206 – 214.
- [19] LIU Zhanfeng, WU Jianping, ZHOU Lixia, et al. Effect of understory fern (*Dicranopteris dichotoma*) removal on substrate utilization patterns of culturable soil bacterial communities in subtropical Eucalyptus plantations[J]. *Pedobiologia*, 2012, **55**(1): 7 – 13.
- [20] 吕锡芝. 北京山区森林植被对坡面水文过程的影响研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2013: 84 – 87. [LYU Xizhi. Research on the influence of forest vegetation on slope hydrological process in Beijing mountainous area[D]. Beijing: PhD Thesis of Beijing Forestry University, 2013: 84 – 87]
- [21] 常松涛, 黄少燕, 查轩, 等. 雨强和植被覆盖度对红壤坡面产流产沙的影响[J]. *水土保持学报*, 2019, **33**(3): 58 – 63. [CHANG Songtao, HUANG Shaoyan, ZHA Xuan, et al. Effects of rainfall intensity and vegetation coverage on runoff and sediment yield on red Soil slope[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, **33**(3): 58 – 63]
- [22] 龚诗涵, 肖洋, 方瑜, 等. 中国森林生态系统地表径流调节特征[J]. *生态学报*, 2016, **36**(22): 7472 – 7478. [GONG Shihan, XIAO Yang, FANG Yu, et al. Forest ecosystem surface run-off regulation characteristics in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(22): 7472 – 7478]
- [23] WANG Jinhua, ZHANG Rongguang, SUN Juan. Experimental study on influence of vegetation coverage on runoff in wind-water erosion crisscross region[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, **121**(2): 20 – 21.
- [24] 纪金华, 章永江, 张一平, 等. 西南干旱对哀牢山常绿阔叶林凋落物及叶面积指数的影响[J]. *生态学报*, 2013, **33**(9): 2877 – 2885. [QI Jinhua, ZHANG Yongjiang, ZHANG Yiping, et al. The impacts of the Southwest China drought on the litterfall and leaf area index of an evergreen broadleaf forest on Ailao Mountain[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(9): 2877 – 2885]
- [25] 杨晓楠, 李晶, 秦克玉, 等. 关中 – 天水经济区生态系统服务的权衡关系[J]. *地理学报*, 2015, **70**(11): 1762 – 1773. [YANG Xiaonan, LI Jing, QIN Keyu, et al. Trade-offs between ecosystem services in Guanzhong-Tianshui Economic Region[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, **70**(11): 1762 – 1773]
- [26] 王耀, 张昌顺, 刘春兰, 等. 三北防护林体系建设工程区森林水源涵养格局变化研究[J]. *生态学报*, 2019, **39**(16): 5847 – 5856. [WANG Yao, ZHANG Changshun, LIU Chunlan, et al. Research on the pattern and change of forest water conservation in Three-North Shelterbelt Forest Program region, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(16): 5847 – 5856]
- [27] 王利, 于立忠, 张金鑫, 等. 浑河上游水源地不同林型水源涵养功能分析[J]. *水土保持学报*, 2015, **29**(3): 249 – 255. [WANG Li, YU Lizhong, ZHANG Jinxin, et al. Analysis of water conservation function of different forest types in the water source area of the upper Hunhe River[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, **29**(3): 249 – 255]
- [28] 刘璐璐, 曹巍, 邵全琴. 南北盘江森林生态系统水源涵养功能评价[J]. *地理科学*, 2016, **36**(4): 603 – 611. [LIU Lulu, CAO Wei, SHAO Quanqin. Water conservation function of forest ecosystem in the southern and northern Pan river watershed[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, **36**(4): 603 – 611]
- [29] NARAIN P, SINGH R K, SINDHWAL N S, et al. Agroforestry for soil and water conservation in the western Himalayan Valley Region

- of India 2[J]. Crop and Tree Production. Agroforestry Systems, 1997, **39**(2): 191–203.
- [30] SANCHEZ L A, ATAROFF M, LÓPEZ R. Soil erosion under different vegetation covers in the Venezuelan Andes [J]. The Environmentalist, 2002, **22**(2): 161–172.
- [31] SUN Dan, ZHANG Weixin, LIN Yongbiao, et al. Soil erosion and water retention varies with plantation type and age [J]. Forest Ecology and Management, 2018(422): 1–10.
- [32] 彭睿文, 罗娅, 余军林, 等. 中国西南地区 2009~2015 年植被覆盖度变化及其与降雨的关系 [J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2017, **35**(5): 15–23. [PENG Ruiwen, LUO Ya, YU Junlin, et al. Vegetation cover change and its relationship with rainfall in Southwest of China during 2009 ~ 2015 [J]. Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences), 2017, **35**(5): 15–23]
- [33] 肖寒, 欧阳志云, 赵景柱, 等. 森林生态系统服务功能及其生态经济价值评估初探——以海南岛尖峰岭热带森林为例 [J]. 应用生态学报, 2000, **11**(4): 481–484. [XIAO Han, OU YANG Zhiyun, ZHAO Jingzhu, et al. Forest ecosystem services and their ecological valuation: a case study of tropical forest in Jianfengling of Hainan island [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2000, **11**(4): 481–484]
- [34] CHEN J M, BLACK T A. Defining leaf area index for non-flat leaves [J]. 1992, **15**(4): 421–429.
- [35] 刘兴元, 龙瑞军, 尚占环. 草地生态系统服务功能及其价值评估方法研究 [J]. 草业学报, 2011, **20**(1): 167–174. [LIU Xingyuan, LONG Ruijun, SHANG Zhanhuan. Evaluation method of ecological services function and their value for grassland ecosystems [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2011, **20**(1): 167–174]
- [36] ZHANG Yifan, ZHAO Qinghe, CAO Zihao, et al. Inhibiting effects of vegetation on the characteristics of runoff and sediment yield on riparian slope along the lower Yellow River [J]. Sustainability, 2019, **11**(13): 3685–3701.
- [37] 王晓学, 沈会涛, 李叙勇, 等. 森林水源涵养功能的多尺度内涵、过程及计量方法 [J]. 生态学报, 2013, **33**(4): 1019–1030. [WANG Xiaoxue, SHEN Huitao, LI Xuyong, et al. Concepts, processes and quantification methods of the forest water conservation at the multiple scales [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, **33**(4): 1019–1030]
- [38] 许珊珊, 金亦, 刘金涛, 等. Budyko 理论在水文气候分区中的应用研究 [J]. 中国农村水利水电, 2017(3): 17–20. [XU Shanshan, JIN Yi, LIU Jintao, et al. The application of Budyko Theory to hydro-climatic classification [J]. China Rural Water and Hydropower, 2017(3): 17–20]
- [39] 俞佳骏, 余树全, 梁立成, 等. 浙江省丽水市莲都区水源涵养功能动态变化及发展趋势 [J]. 浙江农林大学学报, 2018, **35**(2): 189–198. [YU Jiajun, YU Shuquan, LIANG Licheng, et al. Dynamic changes and development of water retention in Liandu District [J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2018, **35**(2): 189–198]
- [40] 刘延惠, 张喜, 崔迎春, 等. 贵州开阳喀斯特山地几种不同植被类型的地表径流研究 [J]. 贵州林业科技, 2005, **33**(2): 8–10. [LIU Yanhui, ZHANG Xi, CUI Yingchun, et al. Study on the surface runoff under different types of vegetations in karst upland of Kaiyang county [J]. Guizhou Forestry Science and Technology, 2005, **33**(2): 8–10]
- [41] 张贵云, 王进, 戴晓勇. 贵州省天然林保护区不同森林类型土壤持水性能的研究 [J]. 农技服务, 2009, **26**(10): 79–80. [ZHANG Guiyun, WANG Jin, DAI Xiaoyong. Research on soil water conservation performance of different forest types in natural forest reserves of Guizhou Province [J]. Serves of Agricultural Technology, 2009, **26**(10): 79–80]
- [42] 葛东媛, 张洪江, 王伟, 等. 重庆四面山林地土壤水分特性 [J]. 北京林业大学学报, 2010, **32**(4): 155–160. [GE Dongyuan, ZHANG Hongjiang, WANG Wei, et al. Soil water characteristics of forestlands in the Simian Mountains of Chongqing southwestern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2010, **32**(4): 155–160]
- [43] 张海燕, 樊江文, 邵全琴, 等. 2000–2010 年中国退牧还草工程区生态系统宏观结构和质量及其动态变化 [J]. 草业学报, 2016, **25**(4): 1–15. [ZHANG Haiyan, FAN Jiangwen, SHAO Quancin, et al. Ecosystem dynamics in the ‘Returning Rangeland to Grassland’ programs, China [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2016, **25**(4): 1–15]
- [44] 刘军, 余铁桥. 大穗型水稻超高产产量形成特点及物质生产分析 [J]. 湖南农业大学学报, 1998(1): 3–5. [LIU Jun, YU Tieqiao. Analysis of the formation of super-high yield of big panicle rice and its dry matter production [J]. Journal of Hunan Agricultural University, 1998(1): 3–5]

Water Conservation Service Evaluation Based on Ecosystem Quality in Southwestern China

SHEN Yuqian^{1,2}, XIAO Yi^{1*}, OUYANG Zhiyun¹, ZHANG Ping³

(1. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China;

2. College of Research and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. College of Environment and Chemical Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

Abstract: Water conservation is an integral part of ecosystem services evaluation. While water balance equations are widely used in water conservation service assessments, many ignore the impacts of ecosystem quality, which can lead to assessment inaccuracy. In this study, three water balance methods were used to assess water conservation services in five provinces in southwestern China, in order to conduct a comparative analysis of evaluation accuracy. The three methods are as follows: Method I built on the conventional water balance principle without consideration of ecosystem quality; Method II took the leaf area index (LAI) as an adjustor; Method III used biomass and vegetation coverage as an adjustor. The results were compared with measured hydrological data. We found that there was no significant difference between the three groups using a paired t -test ($P > 0.05$). Among the three methods, Method III had the highest correlation coefficient at 0.982 ($P < 0.001$), which means Method III can most accurately reflect the water conservation service function of local ecosystems. Method II had the second highest correlation coefficient, while Method I showed the lowest correlation compared to measured hydrological data. These findings can provide reference for future water conservation assessment methods based on different research purposes. In addition, this study contributes insights for the optimization of water conservation services.

Key words: water conservation services; water conservation; biomass; vegetation coverage; Southwestern China