

# 黄土高原小流域植被恢复的土壤水分和养分 权衡效应研究

王世军<sup>1,2</sup>, 杨磊<sup>2\*</sup>, 段兴武<sup>1</sup>, 黄勇<sup>1</sup>, 冯青郁<sup>2</sup>

(1. 云南大学国际河流与生态安全研究院, 云南 昆明 650504; 2. 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)

**摘要:**【目的】明确黄土高原植被恢复影响下土壤水源涵养和养分积累的权衡和协同关系。【方法】基于野外采样和实验分析, 应用多元统计方法研究了典型黄土高原小流域土壤水分和养分对不同植被恢复方式的响应。【结果】(1) 不同类型人工植被恢复均会引起土壤水分含量降低, 尤其是乔、灌植被深层土壤水分消耗较为严重; (2) 植被恢复后土壤养分含量总体增加, 其中乔、灌植被的土壤有机质、全氮、速效钾积累较草地更显著, 然而不同植被类型下的土壤速效磷积累相对较低且无显著差异, 并且所有人工恢复植被均引起土壤全磷和有效氮的降低, 而土壤有机碳和全氮积累随植被恢复年限呈显著增加趋势。(3) 综合考虑土壤水分亏缺和土壤养分积累时, 乔、灌植被存在相对高水分亏缺和相对高养分积累的特征, 相比而言草地土壤水分和养分的权衡更具可持续性。【结论】考虑到半干旱黄土区土壤水分和养分的权衡, 合理的植被配置和对人工乔、灌植被的必要管理应该受到重视。

**关键词:** 土壤水源涵养; 养分保持; 权衡与协同; 黄土高原; 生态系统服务

**中图分类号:** S152.7+5 **文献标识码:** A **文章编号:** 0564-3945(2022)02-0356-10

DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2021080602

王世军, 杨磊, 段兴武, 黄勇, 冯青郁. 黄土高原小流域植被恢复的土壤水分和养分权衡效应研究 [J]. 土壤通报, 2022, 53(2): 356-365

WANG Shi-jun, YANG Lei, DUAN Xing-wu, HUANG Yong, FENG Qing-yu. Trade-off Effects of Soil Moisture and Soil Nutrients under Vegetation Restoration in a Small Watershed on the Loess Plateau, China[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2022, 53(2): 356-365

【研究意义】黄土高原地区大规模人工植被恢复显著改变了土壤过程及其承载的生态系统服务<sup>[1-2]</sup>, 定量辨识土壤水分、养分对植被恢复的响应特征及不同响应之间的权衡与协同关系已成为当前脆弱生态系统生态修复与生态系统服务等研究的重要议题<sup>[3-4]</sup>。【前人研究进展】大量研究表明, 植被恢复方式及其生长年限均能显著影响土壤水分含量和养分储量<sup>[5-7]</sup>。其中, 植被类型直接影响地表和地下生物量, 导致蒸散发、降雨入渗、地表产流等多个水文过程的变化<sup>[8-9]</sup>, 从而影响土壤水源涵养功能。多个研究发现, 不同植被恢复方式的土壤含水量一般为: 天然草地 > 人工灌木林地 > 人工乔木林地, 即人工造林会导致土壤水分显著降低<sup>[10]</sup>, 但受地表生物量的影响, 也会有稀疏灌木土壤水分高于草地<sup>[11]</sup>、茂密灌丛水分低于林地<sup>[12]</sup>的情况出现。实际上, 不同

植被恢复方式下的土壤含水量取决于植被耗水、降水截留、水分入渗和地表产流之间的水分分配。与土壤水分的植被响应不同, 对土壤养分累积而言, Fu 等<sup>[13]</sup>在陕西神木的研究发现, 植被恢复能有效增加土壤有机碳和土壤全氮含量, 但不同植被恢复类型则有所差异。通常, 恢复植被的土壤养分含量(尤其有机碳、全氮)高于农田<sup>[14]</sup>, 但全磷主要受成土母质控制<sup>[15]</sup>。据 Zhang 等<sup>[16]</sup>研究发现, 多年恢复的天然草地 0~25 cm 土层养分含量远高于灌木, 这是因为地表枯落物和植物残体是土壤养分的主要来源<sup>[17-18]</sup>, 天然草地的荣枯变化更有利于近地表土壤养分积累<sup>[6, 19]</sup>。另一方面, 植被会改变土壤微生物群落从而促进养分循环<sup>[20]</sup>, 多年累积生产力决定了土壤养分储量的变化<sup>[20-21]</sup>, 从而导致土壤养分随植被生长年限表现出差异性<sup>[22]</sup>。总体而言, 黄土高原植被恢复增

收稿日期: 2021-08-06; 修订日期: 2022-01-03

基金项目: 国家自然科学基金(41871194; 42077057)和中国科学院青年创新促进会(2018057)资助

作者简介: 王世军(1996-), 男, 云南昭通人, 硕士研究生, 主要从事土壤水文及其植被响应研究。E-mail: 1327565550@qq.com

\*通讯作者: E-mail: leiyan@rcees.ac.cn

加了土壤养分含量,但土壤水分有所减少<sup>[11-12,23]</sup>。

在水资源有限的环境中,土壤水分与植被地上/地下生物量<sup>[24-25]</sup>、土壤碳固存<sup>[26]</sup>、植被覆盖度<sup>[27-28]</sup>和水源涵养<sup>[25,29]</sup>等生态系统服务存在权衡。土壤水分通过影响植被生长、控制凋落物分解,从而间接影响土壤养分积累<sup>[18,30]</sup>。冯棋等<sup>[31]</sup>研究认为一定的土壤水分条件是土壤有机碳合成的必要前提。Lu 等<sup>[1]</sup>研究发现,黄土高原人工刺槐林快速的土壤有机碳、全氮积累以土壤水分消耗为代价,其研究还表明随植被恢复年限的增加土壤含水量显著降低。还有研究表明人工林草植被恢复以土壤水分消耗和速效磷含量降低为代价,而采用封禁措施进行自然恢复的区域土壤水分和养分含量均较高<sup>[32]</sup>。土壤水分是黄土高原植被恢复的关键限制因素<sup>[33]</sup>,耦合土壤水分消耗与养分积累的研究有利于阐明植被恢复的可持续性及其水源涵养和土壤养分积累效应。【本研究切入点】目前针对土壤水分和土壤养分的研究已较为丰富<sup>[34-36]</sup>,但在小流域综合治理背景下耦合土壤水源涵养和养分积累及其协同与权衡关系的研究仍然不足<sup>[37-39]</sup>,明确这一关系是黄土高原人工植被恢复多效益权衡与协同的重要科学问题。【拟解决的问题】本研究以陕北大南沟小流域为例,选取不同年限乔木林地、灌木林地和草地,并以农田作为参照,研究土壤水分和养分对植被恢复的响应特征及二者间的关系,以期为黄土高原植被恢复的可持续性维持以及生态系统服务提升提供科学指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区为陕西省安塞县大南沟小流域(36°54'~36°56'N, 109°16'~109°18'E),海拔 1073~1370 m,为延河的一级支流,流域面积 3.6 km<sup>2</sup>。属暖温带半

干旱气候,多年平均气温 8.8 °C,平均无霜期 157 天;多年平均降水量 531 mm,降水年际变化较大,其中 75% 的降水集中在 6~9 月份,且多呈暴雨形式出现。研究区属典型黄土丘陵沟壑区,流域内土壤以黄土母质上发育的黄绵土为主,质地均一,土质疏松,抗侵蚀能力差。流域现有植被以人工种植的刺槐、柠条、沙棘和天然草本为主。

### 1.2 研究方法

**1.2.1 样品采集和处理** 基于实地调查,选取林地(Forestland,刺槐为主)、灌木(Shrubland,柠条和沙棘)、草地(Grassland,撂荒草地)三种典型植被类型共 35 个样地,并以流域内长期耕作的农田(Cropland,梯田)为参照(表 1)。本研究所选林地、灌木地、草地等均由农田转换而来,因而这些植被恢复下的土壤水分、土壤养分同农田的对比可以反映不同恢复方式的土壤水分和养分响应特征。土壤样品采样时间为 2017 年 7 月中旬,采样期间无降水。使用便携式土钻钻取 0~5 m 深度土壤样品,每 20 cm 间隔取样。在每个样点,土壤养分样品按照“S”型取表层(0~15 cm)土壤样品,并将其混合均匀,样品风干后剔除根系,研磨后分别过 1 mm、0.25 mm 和 0.149 mm 的筛,进行土壤理化性质分析。数据采用 3 次取样的平均值。

**1.2.2 土壤水分和养分测定** 采用烘干法(105 °C, 24 h)测定土壤水分含量,单位为 g g<sup>-1</sup>。采用土壤水分亏缺效应度量植被恢复的土壤水源涵养功能,公式如下:

$$SMDE \text{ (水分积累比)} = \frac{SMC_{jk} - SMC_{ok}}{SMC_{ok}}$$

式中,  $SMC_{jk}$  为  $j$  植被的  $k$  土层土壤含水量(g g<sup>-1</sup>),  $SMC_{ok}$  为对照农田的  $k$  土层土壤含水量。 $SMDE$  为无量纲数据,值为负值表示水分消耗,反之为水分积累。

表 1 不同植被恢复方式与恢复年限样地统计  
Table 1 Statistics of sample plots in different vegetation types and revegetation years

恢复方式 Vegetation type	样地数量 Number of sample plots	恢复年限(a) Revegetation year	海拔(m) Elevation	坡度(°) Slope	主要植物 Dominant plant
农田	1	未恢复	1200~1300	1	土豆、绿豆、谷子
草地	7	2, 21, 27, 28, 51	1200~1350	1-25	长芒草、铁杆蒿、达乌里胡枝子、茵陈蒿
灌木	7	11, 16, 21, 27, 33, 34	1200~1350	24.5~30.5	沙棘、柠条;铁杆蒿、赖草
林地	21	11, 13, 14, 16, 18, 19, 20, 23, 26, 28, 32, 33, 34, 36, 40	1200~1350	19~37.2	刺槐;山杏;铁杆蒿、长芒草、达乌里胡枝子

注:植物拉丁名:土豆(*Solanum tuberosum*)、绿豆(*Vigna radiata*)、谷子(*Setaria italica*)、长芒草(*Stipa bungeana* Trin.)、铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)、茵陈蒿(*Artemisia capillaris* Thunb.)、赖草(*Leymus secalinus* (Georgi) Tzvelev)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、柠条(*Caragana korshinskii* Kom.)、刺槐(*Robinia pseudoacacia* L.)、山杏(*Armeniaca vulgaris* Lam.)。

土壤有机质采用重铬酸钾容量法测定,全氮采用半微量凯氏定氮法,全磷采用硫酸—高氯酸消煮—钼锑抗比色法,有效氮采用碱解—扩散法(碱解氮),速效磷采用  $0.5 \text{ mol L}^{-1}$  碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法,速效钾采用  $1.0 \text{ mol L}^{-1}$  乙酸铵浸提—火焰光度法。每个样品进行 3 次重复实验并取均值作为有效数据。参考冯棋等<sup>[31]</sup>使用的土壤固碳效应公式,本研究使用土壤养分积累效应度量植被恢复的土壤养分积累服务,公式如下:

$$SNAE (\text{养分积累比}) = \frac{SNC_j - SNC_o}{SNC_o}$$

式中,  $SNC_j$  表示  $j$  植被恢复下的土壤养分含量,  $SNC_o$  为对照农田的养分含量。  $SNAE$  也是无量纲数据,正值表示养分积累,反之为养分消耗。

**1.2.3 统计分析方法** 使用 SPSS 18.0 进行描述性统计分析,做单因素方差分析和多重比较 (LSD,  $P < 0.05$ ) 探究不同恢复方式下的水分消耗和养分积累差异,采用 Person 相关分析探究植被恢复年限、土壤水分消耗和养分积累间的关系。作图在 R-3.8 软件和 Origin 2018 完成。

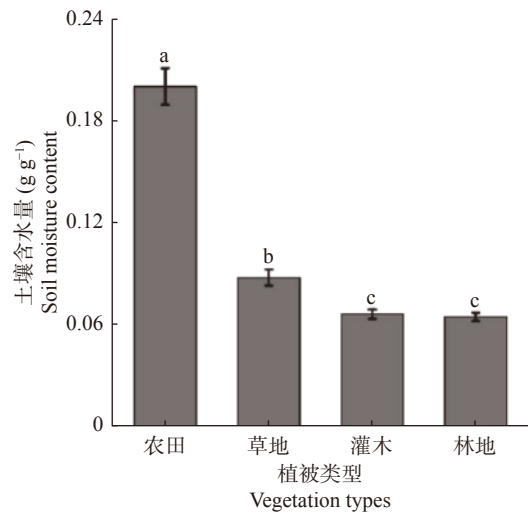
## 2 结果与分析

### 2.1 植被恢复对土壤水分的影响

如图 1 所示,研究区内农田土壤水分含量最高 ( $0.201 \text{ g g}^{-1}$ ),其次为草地 ( $0.088 \text{ g g}^{-1}$ ) 和灌木 ( $0.066 \text{ g g}^{-1}$ ),林地土壤水分含量相对较低 ( $0.065 \text{ g g}^{-1}$ ),仅为农田的 32%,说明不同植被恢复均造成土壤水分含量下降,尤其刺槐林地最为显著。根据图 2,农田土壤水分剖面变化较为连续,并呈现“单峰型”变化趋势,即  $0 \sim 3 \text{ m}$  深度土壤水分含量逐渐升高,  $3 \text{ m}$  以下趋于降低。不同植被恢复下的土壤水分含量总体上均随深度呈增加趋势,但增加值不大。在  $0 \sim 100 \text{ cm}$  范围内,不同恢复类型下的土壤含水量相差较小,而在  $100 \text{ cm}$  以下差别较大;草地  $140 \text{ cm}$  以下波动较大;乔灌植被  $0 \sim 200 \text{ cm}$  内土壤水分含量波动相对深层更大,但不及草本  $0 \sim 140 \text{ cm}$  以下土层波动剧烈。

### 2.2 植被恢复的土壤养分积累和水分亏缺效应

图 3 表明,植被恢复均引起土壤有机质、全氮、速效磷和速效钾的有效积累,并且植被恢复均导致土壤全磷和有效氮含量减少。对不同植被类型而言,乔灌植被的养分积累总体高于草本植被,其中林地



注:字母不同表示差异显著。下同。

图 1 不同植被土壤水分含量

Fig.1 Soil moisture content in different re-vegetation types

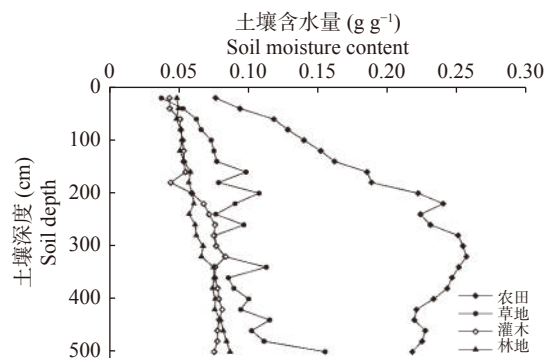


图 2 不同植被 0-5m 剖面土壤含水量

Fig.2 Soil moisture contents in depth of 0-5m in different re-vegetation types

和灌木土壤速效钾积累均显著高于草地,林地土壤有机质显著高于草地,灌木地土壤全氮含量显著高于草地。具体而言,灌木和林地的有机质积累平均值为 1.30 和 1.17,分别是草地积累 (0.50) 的 2.60 倍和 2.34 倍,全氮积累达到草地积累的 3 倍和 2.43 倍,速效钾积累分别是草地积累的 3.51 倍和 2.83 倍。不同恢复方式的速效磷积累无显著差异,且相对其他养分,速效磷积累量最低。不同植被恢复下的土壤全磷和有效氮减少无显著差异。总体而言,植被恢复均引起土壤养分积累增加,但不同恢复方式存在显著差异,不同养分的积累亦如此。

图 4 表明,乔木林地对近地表  $0 \sim 40 \text{ cm}$  土层的水分消耗较其他植被类型低、对  $0 \sim 1 \text{ m}$  和深层  $3 \sim 5 \text{ m}$  的水分消耗较草地高,但差异性均不显著;对  $1 \sim 3 \text{ m}$  土层的水分消耗显著高于草地,但与灌木差

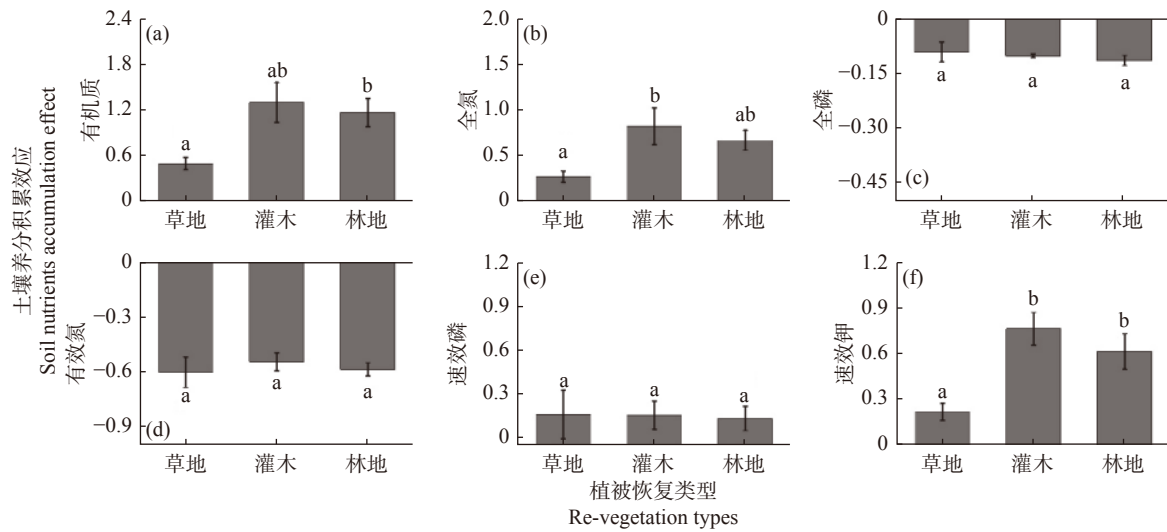


图3 不同植被恢复方式土壤养分积累效应  
Fig.3 Effect of soil nutrients' accumulation in different re-vegetation types

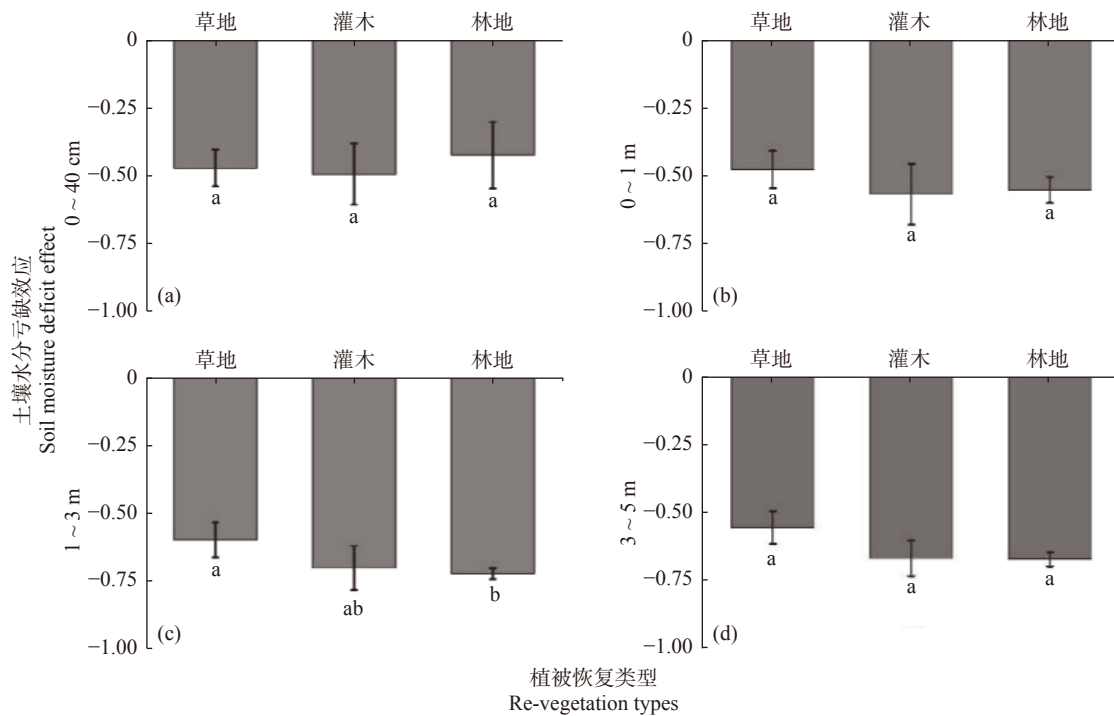


图4 不同植被恢复方式下不同土层的水分亏缺效应  
Fig.4 Effectiveness of soil moisture deficit in four soil layers in different re-vegetation types

异性不显著。总体上，刺槐林地对土壤水分的消耗以深层更多。此外，乔灌植被恢复下的水分亏缺比草地更为严重。

### 2.3 恢复年限、土壤水分亏缺和养分积累的关系

为进一步探究植被恢复影响下土壤水分和养分之间的数量特征，在不考虑植被类型的情况下进行相关分析（表2和图5），可以看出植被恢复年限与土壤有机质、全氮积累（SNAE）呈现极显著相关关系，随恢复年限增加，有机质和全氮积累逐渐增加

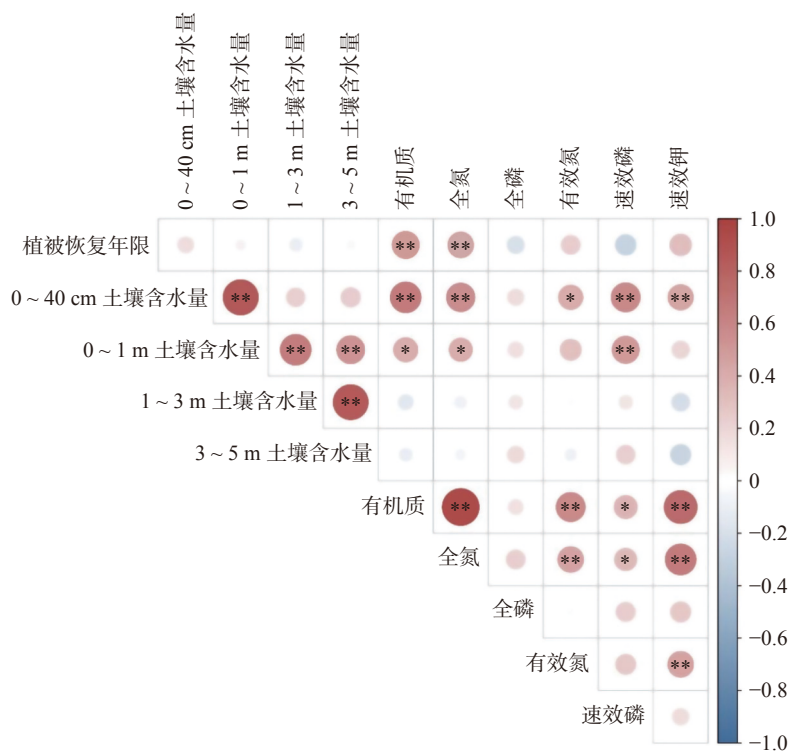
（图6），而恢复年限与其他养分积累无显著相关性。0~1 m的土壤水分亏缺（SMDE）与有机质、全氮和速效磷积累显著正相关，但一次回归函数的拟合优度较低（图6）。尤其0~40 cm的土壤水分亏缺与除全磷之外的土壤养分积累显著正相关。其他土层的水分亏缺与养分积累无显著的相关性。就不同养分指标而言，有机质积累与除全磷外的其他养分积累显著正相关，全氮与速效养分（有效氮、速效磷、速效钾）显著正相关，有效氮与速效钾呈极显



表 2 土壤水分与养分的相关分析结果  
Table 2 Correlation analysis between soil moisture content and soil nutrient content

	有机质 Soil organic matter	全氮 Total nitrogen	全磷 Total phosphorus	有效氮 Available nitrogen	速效磷 Available phosphorus	速效钾 Available potassium
植被恢复年限	0.507**	0.457**	-0.197	0.240	-0.286	0.318
0~40 cm 土壤含水量	0.652**	0.560**	0.174	0.411*	0.582**	0.445**
0~1 m 土壤含水量	0.408*	0.377*	0.157	0.306	0.509**	0.205
1~3 m 土壤含水量	-0.148	-0.09	0.12	-0.028	0.122	-0.214
3~5 m 土壤含水量	-0.106	-0.067	0.185	-0.087	0.233	-0.279
有机质		0.933**	0.145	0.584**	0.367*	0.751**
全氮			0.239	0.459**	0.340*	0.656**
有效氮					0.273	0.459**

注：标注“\*”表示显著性水平为0.05，标注“\*\*”表示显著性水平为0.01。



注：图形越小表示 p 值越大。

图 5 土壤水分和养分相关系数热图

Fig.5 The heat map of correlation analysis between soil moisture content and soil nutrient content

著正相关。值得注意的是，无论是否考虑植被类型差异，本研究土壤含水量随年限变化规律不明显，这说明该研究区的土壤水分具有一定的时间稳定性。

### 3 讨论

#### 3.1 土壤水分对植被恢复的响应

植被通过冠层截留和蒸发、促进降水入渗、根系吸收和叶面蒸腾等对土壤水分产生作用<sup>[12]</sup>，不同植被恢复方式对上述生理生态过程的作用差异造成流域土壤水分含量的时空差异性<sup>[28]</sup>。在黄土高原，农田和草地的土壤含水量通常高于乔灌植被<sup>[40]</sup>，这得益于农田平坦的地势有利于降雨入渗<sup>[41]</sup>，农作物和草地水

分消耗量较低，且根系耗水深度浅容易得到降雨补充<sup>[42]</sup>，而需水量和耗水深度大的人工乔灌植被往往造成土壤含水量严重下降<sup>[10]</sup>。姚雪玲等<sup>[43]</sup>研究发现，黄土高原不同植被类型下的土壤含水量相对大小具有时间稳定性。与前人研究结果较为一致，本研究发现土壤含水量为农田 > 草地 > 灌木 > 林地（图 1），即长期耕作的农田具有最高的土壤水分含量，而植被恢复措施均引起土壤水分含量的大幅下降，尤其乔灌植被最为严重，成熟刺槐林地的土壤含水量仅为农田的 32%（0.065 g g<sup>-1</sup>）。在黄土高原大规模退耕还林的背景下，农田（梯田）较好的土壤水分条

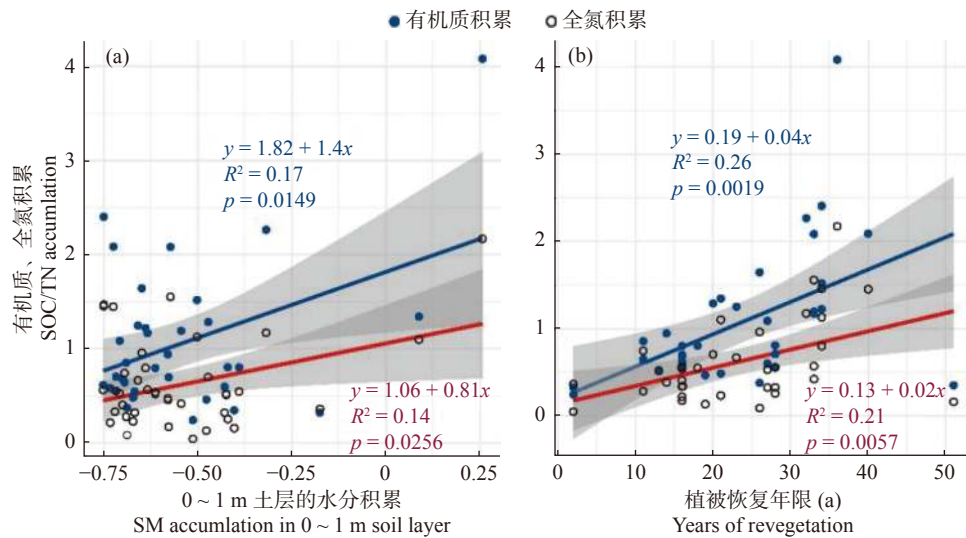


图6 有机质和全氮积累随0-1m土壤水分积累和植被恢复年限的变化

Fig.6 Changes of soil organic matter and total nitrogen accumulation with soil moisture accumulation in 0-1m soil layer and years of revegetation

件对维护区域粮食安全具有重要意义,其水土保持优势也是黄土高原生态安全的重要支撑<sup>[44]</sup>。

虽有研究发现灌木的土壤含水量低于林地<sup>[12]</sup>,本研究发现灌木的土壤水分含量均值略高于林地,这与黄土高原的多个研究结果一致。这可能是因为多年生灌木(沙棘和柠条)的水分消耗不及刺槐林地,尽管灌木林存在更高的冠层截留<sup>[45]</sup>。此外,本研究中农田深层土壤含水量较浅层高,尤其在0~3m的深度土壤含水量逐渐增加(图2)。这说明农田平坦的地势和耕作行为(翻耕)有利于降水入渗到较深土层。农田2m深度直至地表的土壤含水量逐渐下降,可能是蒸发作用随深度而减弱的结果<sup>[12]</sup>。由图2可见,草本植被倾向于平衡近地表根区的土壤水分,降低0~140cm剖面土壤水分波动,而乔灌植被2m以下的深层则更加稳定。草地土壤含水量较其他恢复方式更高且剖面波动更强,尤其在140cm深度以下,可能是因为该地区天然草地以浅根系草本植物为主,集中分布在0~20cm土层的根系系统主要通过近地表的根系扩张寻找水源<sup>[45-46]</sup>,使得0~140cm的土壤含水量在降水和根系吸水的联合作用下较低且更稳定<sup>[47]</sup>,而缺乏根系分布的较深土层土壤含水量受降水下渗补给和土壤性质等影响而呈现较大波动。乔灌植被根系优先流作用使得0~2m土层降水不均匀入渗<sup>[23]</sup>,而2m以下的深层根系向湿润土壤的觅食作用可能是其土壤含水量较低且更为稳定的原因<sup>[48-49]</sup>。总体上,不同恢复植被的表层0~1m土壤含水量差异较小,1m以下的土壤含水量随深度呈增加趋势且

差异逐渐变大(见图2),这与Yang等<sup>[50]</sup>的研究结果相似,植被恢复的土壤水分差异主要体现在较深土层。土壤水的剖面变化体现了降水补给、蒸发和植被作用的综合结果。不同植被恢复下近地表0~40cm和表层0~1m深度的土壤水分亏缺量无显著差异(图4),可能是因为黄土高原1m深度内的土壤水分受气候因素(如降雨和辐射)的影响比较大<sup>[33]</sup>,降低了不同植被恢复下的水分消耗差异。

### 3.2 土壤养分对植被恢复的响应

在黄土高原,植被恢复引起土壤养分的增加已被许多学者证实,但不同恢复方式、不同的养分指标都存在差异。本研究中,植被恢复后有机质含量均增加,说明地表覆盖增加引起土壤表层的植物残体和枯枝落叶积累,土壤腐殖质化作用增强使得有机质含量较高<sup>[51]</sup>。尽管有研究证实天然草地对有机碳、全氮的固存更有利<sup>[19]</sup>,但本研究中草地的有机质和全氮积累明显不及乔灌植被(图3),这可能是因为研究区的降水背景差异。据Tuo等<sup>[52]</sup>报道,降水是影响养分积累最重要的环境因素,植被在此基础上起关键作用,在降水量不足510mm的地区,草地恢复较人工乔灌更有利于土壤有机碳和全氮固存。本研究区降水为531mm,乔灌植被的生长可能相对较好,大量的枯枝落叶为土壤养分提供了基础<sup>[17]</sup>。除降水和植被类型外,植被恢复年限也是重要的影响因素,土壤有机氮和全碳积累随恢复年限而增加<sup>[21]</sup>,本研究结果与此一致(图6)。

由图3可见,植被恢复后土壤速效磷、速效钾

基本实现了正积累,说明植被恢复后土壤有效养分改善明显。其中,林地和灌木的速效钾积累最为显著,可能是乔灌植被凋落物较多,林下微生物分解凋落物时形成的酚、有机酸和无机酸等物质有效促进了含钾矿物的风化,使封闭的无效态钾释放转化为有效态钾,从而显著增加土壤速效钾的含量<sup>[53]</sup>。值得注意的是,本研究发现植被恢复均引起土壤全磷、有效氮下降,而不同恢复方式的减少量无显著差异。这与 Jiao 等<sup>[22]</sup>和 Liu 等<sup>[54]</sup>的研究结果相似,他们发现植被恢复(草地、刺槐林地)后土壤全磷含量下降。这是因为农田施肥导致全磷、有效氮的本底值较高,植被恢复后降水淋溶也使得有效氮大幅下降,从而积累比(SNAE)为负值。此外,有研究发现全磷主要受成土母质影响,植被作用较小<sup>[15]</sup>。土壤有机质是土壤氮的基质<sup>[55]</sup>,以往研究发现土壤碳氮显著正相关,土壤碳积累是氮积累的 8~10 倍<sup>[7]</sup>。本研究中,土壤有机质和除全磷之外的其他养分(全氮、有效氮、速效磷、速效钾)均显著正相关,尤其与全氮极显著正相关( $R = 0.93$ ),而其他养分间的相关性较弱甚至不相关,这与前人研究结果相似<sup>[56]</sup>,说明土壤养分是密切相关的,尤其土壤有机质的积累有利于其他土壤养分循环与积累<sup>[20]</sup>。

### 3.3 植被恢复的养分积累和水分亏缺关系

相关分析显示,不考虑植被类型的情况下地表 0~40 cm 的水分亏缺比和土壤有机质、全氮积累比呈极显著正相关关系,与速效养分(有效氮、速效磷、速效钾)显著正相关(表 2)。由图 6 可以看出,有机质和全氮积累随 0~1 m 土壤水分积累的增加而趋于增加,尤其在土壤水分正积累的时候,有机质和全氮积累极为显著。这表明土壤养分的积累可能以土壤水分积累为前提,植被保水效果下降可能会直接削弱其蓄肥能力。由于干旱半干旱黄土高原区土壤降水补给深度在 0~1 m 最有效<sup>[45,57]</sup>,以大量消耗水分为代价的养分积累显然不具有可持续性。如 Zhang 等<sup>[16]</sup>发现人工柠条在吸收 1 m 以下的土壤水分后,土壤含水量快速降低,土壤含水量和养分含量(碳氮磷)均显著低于天然草地。

此外,植被生产力提高能增加碳输入<sup>[58]</sup>。植被地下生物量以根系为主,而水分亏缺会制约细根生长,从而限制有机质输入<sup>[59-60]</sup>。乔灌植被为主的恢复方式对土壤养分的增加最为显著,但乔灌植被的高生物量维持以水分消耗为代价。黄土高原地下水埋藏深,

降水是土壤水唯一的补给源<sup>[61]</sup>。在干旱半干旱区降水有限的条件下,植被恢复造成土壤水分大量消耗时必然导致植被生产力下降,从而土壤养分(尤其是有机质)输入降低。Wang 等<sup>[42]</sup>研究发现人工植被(乔灌)已造成小流域土壤水分亏缺,建议今后的植被恢复应重视草地配置。此外,Wu 等<sup>[36]</sup>通过 meta 分析证实全球半干旱区草地能够在土壤侵蚀控制和地表水资源之间取得更好的平衡,而较低的土壤侵蚀强度有利于养分积累。本研究中,撂荒草地植被生存策略为更低的水分消耗和缓慢的养分积累,而人工乔灌植被为更快的水分消耗和较快的养分积累。有研究认为,适当的景观管理措施(如间伐)降低乔灌密度有利于维持其生态修复效果<sup>[62]</sup>。因此考虑到水分消耗和养分积累时,流域综合治理应该关注不同植被类型的合理配置及植被管理。

## 4 结论

植被恢复均造成土壤水分亏缺而养分积累,但不同恢复方式存在差异。乔灌植被的土壤水分消耗较草地更高,同时养分积累(有机质、全氮、速效钾)也更为显著。植被对土壤磷(全磷、速效磷)的影响较小,不同植被恢复类型下的土壤全磷减少、速效磷积累均无显著差异。植被生长年限影响土壤养分积累,随恢复年限增加,土壤有机质和全氮显著增加,其他养分指标变化不显著。鉴于半干旱黄土高原植被恢复下土壤水分和养分的权衡,考虑到生态恢复的可持续性,合理的植被配置和必要的植被管理应该受到重视。

### 参考文献:

- [1] Lu N, Fu B J, Jin T T, et al. Trade-off analyses of multiple ecosystem services by plantations along a precipitation gradient across Loess Plateau landscapes[J]. *Landscape Ecology*, 2014, 29(10): 1697-708.
- [2] 张 琨, 吕一河, 傅伯杰, 等. 黄土高原植被覆盖变化对生态系统服务影响及其阈值[J]. *地理学报*, 2020, 75(5): 949-60.
- [3] 朱 青, 廖凯华, 赖晓明, 等. 流域多尺度土壤水分监测与模拟研究进展[J]. *地理科学进展*, 2019, 38(8): 1150-8.
- [4] 邱 扬, 王 勇, 傅伯杰, 等. 土壤质量时空变异及其与环境因子的时空关系[J]. *地理科学进展*, 2008, 27(4): 42-50.
- [5] Zhao C L, Jia X X, Zhu Y J, et al. Long-term temporal variations of soil water content under different vegetation types in the Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2017, 158: 55-62.
- [6] Yang S Q, Zhao W W, Pereira P. Determinations of environmental factors on interactive soil properties across different land-use types



- on the Loess Plateau, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 738: 140270.
- [ 7 ] Deng L, Wang G L, Liu G B, et al. Effects of age and land-use changes on soil carbon and nitrogen sequestrations following cropland abandonment on the Loess Plateau, China[J]. *Ecological Engineering*, 2016, 90: 105 – 12.
- [ 8 ] 姜 娜, 邵明安. 黄土高原小流域不同坡地利用方式的水土流失特征[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(6): 36 – 41.
- [ 9 ] 王 辉, 王全九, 邵明安. 表层土壤容重对黄土坡面养分随径流迁移的影响[J]. *水土保持学报*, 2007, 21(3): 10 – 3 + 8.
- [ 10 ] Jia X X, Shao M A, Zhu Y J, et al. Soil moisture decline due to afforestation across the Loess Plateau, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 546: 113 – 22.
- [ 11 ] Jiao F, Wen Z M, An S S. Soil water storage capacity under chronosequence of revegetation in Yanhe watershed on the Loess Plateau, China[J]. *Springer Plus*, 2013, 2(1): 1 – 15.
- [ 12 ] Huang Y L, Chen L D, Fu B J, et al. Effect of land use and topography on spatial variability of soil moisture in a gully catchment of the Loess Plateau, China[J]. *Ecohydrology*, 2012, 5(6): 826 – 33.
- [ 13 ] Fu X L, Shao M A, Wei X R, et al. Soil organic carbon and total nitrogen as affected by vegetation types in Northern Loess Plateau of China[J]. *Geoderma*, 2010, 155(1-2): 31 – 5.
- [ 14 ] 孙 蹇, 王 兵, 周怀平, 等. 黄土丘陵区小流域土壤碳氮磷生态化学计量特征的空间变异性[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(03): 766 – 74.
- [ 15 ] 于博威, 刘高焕, 刘庆生, 等. 晋西黄土丘陵区不同退耕年限刺槐林土壤养分效应[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(04): 188 – 93.
- [ 16 ] Zhang C C, Wang Y Q, Jia X X, et al. Impacts of shrub introduction on soil properties and implications for dryland revegetation[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 742: 140498.
- [ 17 ] 张向茹, 马露莎, 陈亚南, 等. 黄土高原不同纬度下刺槐林土壤生态化学计量学特征研究[J]. *土壤学报*, 2013, 50(4): 818 – 25.
- [ 18 ] Zhang W, Gao D X, Chen Z X, et al. Substrate quality and soil environmental conditions predict litter decomposition and drive soil nutrient dynamics following afforestation on the Loess Plateau of China[J]. *Geoderma*, 2018, 325: 152 – 61.
- [ 19 ] Zhang C, Liu G B, Xue S, et al. Soil organic carbon and total nitrogen storage as affected by land use in a small watershed of the Loess Plateau, China[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2013, 54: 16 – 24.
- [ 20 ] Li J W, Li M Y, Dong L B, et al. Plant productivity and microbial composition drive soil carbon and nitrogen sequestrations following cropland abandonment[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 744: 140802.
- [ 21 ] Zhang Y H, Wang R, Peng X X, et al. Changes in soil organic carbon and total nitrogen in apple orchards in different climate regions on the Loess Plateau[J]. *Catena*, 2021, 197: 104989.
- [ 22 ] Jiao F, Wen Z M, An S S, et al. Successional changes in soil stoichiometry after land abandonment in Loess Plateau, China[J]. *Ecological Engineering*, 2013, 58: 249 – 54.
- [ 23 ] Wang S, Fu B J, Gao G Y, et al. Responses of soil moisture in different land cover types to rainfall events in a re-vegetation catchment area of the Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2013, 101: 122 – 8.
- [ 24 ] Su B Q, Su Z X, Shanguan Z. Trade-off analyses of plant biomass and soil moisture relations on the Loess Plateau[J]. *Catena*, 2021, 197: 104946.
- [ 25 ] 王晓峰, 马 雪, 冯晓明, 等. 重点脆弱生态区生态系统服务权衡与协同关系时空特征[J]. *生态学报*, 2019, 39(20): 7344 – 55.
- [ 26 ] Feng Q, Zhao W W, Fu B J, et al. Ecosystem service trade-offs and their influencing factors: A case study in the Loess Plateau of China[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 607: 1250 – 63.
- [ 27 ] Wang C, Wang S, Fu B J, et al. Integrating vegetation suitability in sustainable revegetation for the Loess Plateau, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 759: 143572.
- [ 28 ] Tian F, Feng X M, Zhang L, et al. Effects of revegetation on soil moisture under different precipitation gradients in the Loess Plateau, China[J]. *Hydrology Research*, 2017, 48(5): 1378 – 90.
- [ 29 ] Jiang C, Guo H W, Wei Y P, et al. Ecological restoration is not sufficient for reconciling the trade-off between soil retention and water yield: A contrasting study from catchment governance perspective[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 754: 142139.
- [ 30 ] Wang Y N, Li F Y, Song X, et al. Changes in litter decomposition rate of dominant plants in a semi-arid steppe across different land-use types: Soil moisture, not home-field advantage, plays a dominant role[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2020, 303: 104989.
- [ 31 ] 冯 棋, 杨 磊, 王 晶, 等. 黄土丘陵区植被恢复的土壤碳水效应[J]. *生态学报*, 2019, 39(18): 6598 – 609.
- [ 32 ] 焦菊英, 焦 峰, 温仲明. 黄土丘陵沟壑区不同恢复方式下植物群落的土壤水分和养分特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2006, (5): 667 – 74.
- [ 33 ] Yu B W, Liu G H, Liu Q S, et al. Soil moisture variations at different topographic domains and land use types in the semi-arid Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2018, 165: 125 – 32.
- [ 34 ] Cheng R R, Chen Q W, Zhang J G, et al. Soil moisture variations in response to precipitation in different vegetation types: A multi-year study in the loess hilly region in China [J]. *Ecohydrology*, 2020, 13(3).
- [ 35 ] 杨 阳, 朱元骏, 安韶山. 黄土高原生态水文过程研究进展[J]. *生态学报*, 2018, 38(11): 4052 – 63.
- [ 36 ] Wu G L, Liu Y F, Cui Z, et al. Trade-off between vegetation type, soil erosion control and surface water in global semi-arid regions: A meta-analysis[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2020, 57(5): 875 – 85.
- [ 37 ] 赵风华, 于贵瑞. 陆地生态系统碳—水耦合机制初探[J]. *地理科学进展*, 2008, 27(1): 32 – 8.



- [ 38 ] Huang L M, Shao M A. Advances and perspectives on soil water research in China's Loess Plateau[J]. *Earth-Science Reviews*, 2019, 199: 102962.
- [ 39 ] 冯 舒, 赵文武, 陈利顶, 等. 2010年来黄土高原景观生态研究进展[J]. *生态学报*, 2017, 37(12): 3957 – 66.
- [ 40 ] Fu B J, Wang J, Chen L D, et al. The effects of land use on soil moisture variation in the Danangou catchment of the Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2003, 54(1): 197 – 213.
- [ 41 ] Zhao Y L, Wang Y Q, Wang L, et al. Exploring the role of land restoration in the spatial patterns of deep soil water at watershed scales[J]. *Catena*, 2019, 172: 387 – 96.
- [ 42 ] Wang Y Q, Shao M A, Sun H, et al. Response of deep soil drought to precipitation, land use and topography across a semiarid watershed[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2020, 282-283: 107866.
- [ 43 ] 姚雪玲, 傅伯杰, 吕一河. 黄土丘陵沟壑区坡面尺度土壤水分空间变异及影响因子[J]. *生态学报*, 2012, 32(16): 4961 – 8.
- [ 44 ] 杨 磊, 冯青郁, 陈利顶. 黄土高原水土保持工程措施的生态系统服务[J]. *资源科学*, 2020, 42(1): 87 – 95.
- [ 45 ] Yang L, Zhang H D, Chen L D. Identification on threshold and efficiency of rainfall replenishment to soil water in semi-arid loess hilly areas[J]. *Science China-Earth Sciences*, 2018, 61(3): 292 – 301.
- [ 46 ] 常恩浩, 李 鹏, 张铁钢, 等. 旱季雨季对黄土丘陵退耕区植被根系分布及水分利用的影响[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(24): 129 – 38.
- [ 47 ] Yao X L, Fu B J, Lü Y H, et al. The multi-scale spatial variance of soil moisture in the semi-arid Loess Plateau of China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2012, 12(5): 694 – 703.
- [ 48 ] You W Z, Zeng D H, Liu M G, et al. Spatial and temporal variations of soil moisture in three types of agroforestry boundaries in the Loess Plateau, China[J]. *Journal of Forestry Research*, 2010, 21(4): 415 – 22.
- [ 49 ] 苟清平, 朱清科, 李依璇, 等. 陕北黄土区不同林地土壤干燥化效应[J]. *生态学报*, 2019, 39(19): 7161 – 8.
- [ 50 ] Yang L, Chen L D, Wei W, et al. Comparison of deep soil moisture in two re-vegetation watersheds in semi-arid regions[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 513: 314 – 21.
- [ 51 ] Chen H S, Shao M A, Li Y Y. Soil desiccation in the Loess Plateau of China[J]. *Geoderma*, 2008, 143: 91 – 100.
- [ 52 ] Tuo D F, Gao G Y, Chang R Y, et al. Effects of revegetation and precipitation gradient on soil carbon and nitrogen variations in deep profiles on the Loess Plateau of China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 626: 399 – 411.
- [ 53 ] 刘更另, 黄新江, 冯云峰. 红壤丘陵自然植被恢复及其对某些土壤条件的影响[J]. *中国农业科学*, 1990, 23(3): 60 – 9.
- [ 54 ] Liu Y, Fang Y, An S. How C: N: P stoichiometry in soils and plants responds to succession in Robinia pseudoacacia forests on the Loess Plateau, China[J]. *Forest Ecology and Management*, 2020, 475: 118394.
- [ 55 ] 高 涵, 肖 礼, 牛 丹, 等. 宁南山区退耕还林还草对土壤氮素组成及其转化酶活的影响[J]. *环境科学*, 2019, 40(8): 3825 – 32.
- [ 56 ] 孙美美, 关晋宏, 岳军伟, 等. 黄土高原西部针叶林植物器官与土壤碳氮磷化学计量特征[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(3): 202 – 8.
- [ 57 ] Yang L, Wei W, Chen L, et al. Spatial variations of shallow and deep soil moisture in the semi-arid Loess Plateau, China[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2012, 16(162): 3199 – 217.
- [ 58 ] Deng L, Peng C, Huang C, et al. Drivers of soil microbial metabolic limitation changes along a vegetation restoration gradient on the Loess Plateau, China[J]. *Geoderma*, 2019, 353: 188 – 200.
- [ 59 ] 曹 扬, 赵 忠, 渠 美, 等. 刺槐根系对深层土壤水分的影响[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(5): 765 – 8.
- [ 60 ] 安 慧, 韦兰英, 刘 勇, 等. 黄土丘陵区油松人工林和白桦天然林细根垂直分布及其与土壤养分的关系[J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(4): 611 – 9.
- [ 61 ] Chen L D, Huang Z L, Gong J, et al. The effect of land cover/vegetation on soil water dynamic in the hilly area of the loess plateau, China[J]. *Catena*, 2007, 70(2): 200 – 8.
- [ 62 ] Yang L, Wei W, Chen L D, et al. Response of deep soil moisture to land use and afforestation in the semi-arid Loess Plateau, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 475: 111 – 22.

## Trade-off Effects of Soil Moisture and Soil Nutrients under Vegetation Restoration in a Small Watershed on the Loess Plateau, China

WANG Shi-jun<sup>1,2</sup>, YANG Lei<sup>2\*</sup>, DUAN Xing-wu<sup>1</sup>, HUANG Yong<sup>1</sup>, FENG Qing-yu<sup>2</sup>

(1. Institute of International River and Eco-Security, Yunnan University, Kunming 650504, China; 2. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

**Abstract:** [Objective] Identifying the tradeoffs and synergies between soil water conservation and soil nutrient accumulation is one of the key issues in exploring influence of human activities on soil ecosystem services. [Method] Based on field sampling and experimental analysis, multivariate statistical methods were used to study the responses of soil moisture and nutrients to different re-vegetation types in a typical loess watershed. [Result] (1) All introduced vegetation restorations would decrease soil water content, especially the deep soil layers in forests and shrubs. Generally, re-vegetation could increase soil nutrients. (2) The accumulation of soil organic matter (SOC), total nitrogen (N) and available potassium (K) in forestland and shrubland were significantly higher than those in grassland. However, the accumulation of available phosphorus (P) was relatively lower than other soil nutrients and has no significant difference between different vegetation types. In addition, all introduced vegetation could cause decreasing of total P and available N. The accumulations of SOC and total N significantly increased with the years of vegetation growth. (3) The significant correlations between soil moisture deficit and high soil nutrient accumulation were found in forests and shrubs and showed relatively high tradeoff between these two soil ecosystem services. The tradeoff and synergy between soil moisture content and soil nutrient content in grasslands suggested relatively sustainability of soil ecosystem services than other vegetation types. [Conclusion] Considering the tradeoff and synergy between soil moisture and soil nutrient in different vegetation restoration types in semi-arid Loess Plateau, scientific guidance and reasonable land management on introduced vegetation should be considered.

**Key words:** Soil water conservation; Nutrient maintenance; Trade-off and synergy; Loess Plateau; Ecosystem services

[责任编辑: 张玉玲]