

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2015.01.010

黄土丘陵区不同植被恢复模式对沟谷地土壤碳氮磷元素的影响

徐 明^{1,2}, 张 健^{1,3}, 刘国彬^{1,4*}, 张 婷^{1,2}

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100;
2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100086;
4. 西北农林科技大学, 陕西 杨凌 712100)

摘要:选取黄土丘陵区 3 种代表性植被恢复模式的沟谷地样地:人工刺槐(*Robinia pseudoacacia*)林沟谷地(G-Rp), 人工柠条(*Caragana korshinskii*)灌丛沟谷地(G-Ck)和天然草地沟谷地(G-Ng)。通过分析沟谷地 5 个坡位样带的土壤样品,评价了不同植被恢复模式对沟谷地土壤碳氮磷元素的影响。结果表明:3 种植物恢复模式对沟谷地土壤有机碳和全氮的含量及储量具有显著的改善作用,对土壤全磷含量及储量略有减少的影响,其中柠条灌丛沟谷地土壤磷相对于对照(坡耕地)减少达显著差异($P < 0.05$);土壤碳氮磷的含量及储量在沟谷地的空间分布存在显著差异($P < 0.05$),总体呈由上到下递增趋势(除 G-Rp 沟底);沟谷地土壤碳氮元素间呈正向和极显著的线性相关关系($P < 0.0001$)。在黄土丘陵区沟谷地地貌单元实施植被恢复,可显著地提高沟谷地土壤的碳汇和氮素储量。

关键词:植被恢复;地形;沟谷地;刺槐;柠条

中图分类号:S158.3

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2015)01-0062-07

Effects of Revegetation Types on the Soil Carbon, Nitrogen and Phosphorus of the Gully Areas in Hilly Loess Plateau, China

XU Ming^{1,2}, ZHANG Jian^{1,3}, LIU Guo-bin^{1,4*}, ZHANG Ting^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry Land Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi Province 712100, China;
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Science, Beijing 100086, China;
4. Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi Province 712100, China)

Abstract: In this study, three representative vegetation restoration patterns were selected in gully areas including an artificial *Robinia pseudoacacia* forest gully (G-Rp), an artificial *Caragana korshinskii* shrubland gully (G-Ck), and a natural grassland gully (G-Ng). Soil samples were collected along five gully position transects on each gully. The study evaluated the effects of three revegetation types on the soil carbon, nitrogen and phosphorus of the gully areas. Results indicated that three revegetation types in the gully areas could significantly improve soil organic carbon and soil total nitrogen contents and storages, and slightly reduce soil P contents and storages. G-Ck significantly reduced soil P contents and storages compared with CK (slope cropland) ($P < 0.05$). The spatial distributions of soil C, N, P contents and storages were significantly different among three gully areas ($P < 0.05$). There was a significantly and positively linear correlation between soil C and N ($P < 0.0001$). Therefore, the implementation of revegetation in gully area, as one of important geomorphic unit, can significantly increase carbon sequestration and N stocks.

Key words: Revegetation; Topography; Gully area; *Robinia pseudoacacia*; *Caragana korshinskii*

收稿日期:2014-03-06;修回日期:2014-06-23

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项(XDA05060300)资助

作者简介:徐明(1982-),女,安徽天长人,博士研究生,主要研究流域生态恢复与管理,E-mail: mingxu566@163.com; * 通信作者 Author for correspondence, E-mail: gblu@ms.iswc.ac.cn

土壤碳、氮、磷元素在陆地生态系统中发挥着重要的生态功能,影响着土壤性质、植物生长、土壤微生物活性及物质循环等多个方面^[1-2]。土壤碳、氮、磷元素在生态系统过程中是一个动态的循环过程,对生态环境存在不同的影响。一方面,土壤碳、氮、磷含量是土壤肥力和质量的重要指标,与土地生产力存在密切联系,对于农业生态系统或退化生态系统来讲,人为增加一定比例和数量的碳、氮、磷元素有利于维持土地生产力和促进生态系统恢复。另一方面,由于土地利用方式和管理措施不当,使得过量的氮、磷随淋溶、土壤侵蚀等过程进入水体从而产生富营养化的环境问题;与此同时,土壤有机碳储量减少也会促进碳排放,进一步加剧了大气的温室效应,这些环境问题已成为国际共同关注的热点问题^[3-4]。因此,对生态系统土壤碳、氮、磷元素变化动态的进一步研究和认识,有利于我们促进对土壤碳、氮、磷元素的有效利用、避免相关环境问题的发生,从而提高对生态环境的科学管理和保护。

黄土丘陵区是我国西部退耕还林还草及生态环境建设的重点区域^[5]。特别是1998年“退耕还林还草工程”实施以来,该区域上的土地利用格局发生着巨大的变化,研究不同植被恢复群落土壤性质的变化已经成为退耕还林生态效益评价的热点问题之一^[6-9]。沟谷地作为黄土丘陵区的重要地貌单元,沟谷地植被恢复和重建已经开展了大量的实践工作^[10-11],然而有关沟谷地地貌单元上不同植被恢复模式对土壤性质的影响还鲜见^[12-14]。研究选取了黄土丘陵区沟谷地上3种植被恢复模式,分别代表着乔、灌、草植被恢复群落;探讨经历20年左右恢复时间后,不同植被恢复模式对沟谷地土壤有机碳、全氮、全磷的影响效果,以期为该区沟谷地地貌单元的植被恢复与重建工作提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕北安塞县(E 105°51'44"~109°26'18", N 36°22'40"~36°32'16"),该区地形破碎,沟壑纵横,属典型的黄土高原丘陵沟壑区,其中,以梁峁坡地为主的丘陵沟壑地形,梁峁坡地占全县总土地面积的44.17%,沟谷地占36.36%^[15]。气候属暖温带半干旱半湿润气候,年均降雨量为500 mm左右,且70%左右多分布于6—9月间,年平均蒸发量1 000 mm,无霜期160~180 d左右,年日照

时数2 352~2 573 h,≥10℃积温2 866℃,年均气温8.9℃。植被分区属于暖温带森林草原过渡带,天然森林已破坏,现有植被主要以刺槐(*Robinia pseudoacacia*)和侧柏(*Platycladus orientalis*)等为主的人工林;以柠条(*Caragana korshinskii*)和沙棘(*Hippophae rhamnoides*)等为主的人工林灌丛;特别是自1998年实施退耕还林工程以来,该县退耕还林面积约1 100 km²,其中退耕地面积约500 km²,退荒草地面积约502 km²,全县林草覆盖率由22.4%提高到2010年的49.6%^[16]。

1.2 样地选择与土壤采集

为研究不同植被恢复模式对沟谷地土壤碳氮磷储量的影响,通过对野外大量勘查,确定立地条件、植被恢复年限、恢复模式及恢复前的土地利用状况的基础上,选取了3条沟道,初始条件基本相同、由南向北的沟向和植被恢复年限约20年左右,这3条不同恢复模式沟谷地分别为:人工森林植被恢复模式的刺槐林沟谷地(the artificial *R. pseudoacacia* forest gully, G-Rp),人工灌丛植被恢复模式的柠条灌丛沟谷地(the artificial *C. korshinskii* shrubland gully, G-Ck),和自然恢复模式的天然草地沟谷地(the natural grassland gully, G-Ng)。每个沟道设置5个样带区,分别为:西坡上部(W-upper)、西坡下部(W-lower)、沟坡底部(Bottom)、东坡下部(E-lower)和东坡上部(E-upper)。每个样带上以15~25 m间隔随机设立10个5 m×5 m样方进行植被调查和采集土样,其中关于植被群落调查方法可详见文献[17]。每个样方内的土壤样品用土钻采集随机6点0~20 cm土壤深度的土壤混合样品,样品采回后,剔除石块和动植物残体等杂质,风干,磨碎,过筛后装袋备用。同时,为了研究不同植被恢复模式对土壤性质的改善程度,选取坡耕地(slope cropland, CK)为对照样地,3个样地重复。

1.3 样品分析

容重(bulk density, BD)测定采用环刀法;土壤有机碳(soil organic carbon, SOC):采用H₂SO₄-KCr₂O₇氧化-外加热法;全氮(total nitrogen, TN)含量采用半微量凯氏定氮法,全磷(total phosphorus, TP)用硫酸-高氯酸消煮-钼锑抗比色法。

表 1 样地基本信息
Table 1 Basic information of site

样地 Site	沟向 Direction	海拔/m Altitude	样带坡位 Position of sampling transect	沟坡坡度幅度/ $^{\circ}$ Slope degree	恢复年限/a Restoration years	恢复模式 Vegetation restoration patterns
G-Rp	南北沟 From south to north	1100~1300	西坡上部 W-upper、 西坡下部 W-lower、	25~45	24	人工乔木林(刺槐) Artificial arbor forest (<i>R. pseudoacacia</i>)
G-Ck		1090~1250	沟坡底部 Bottom、 东坡下部 E-lower、	25~45	19	人工灌丛(柠条) Artificial shrub (<i>C. korshinskii</i>)
G-Ng		1080~1275	东坡上部 E-upper	20~45	21	自然恢复(天然草地) Natural recovery (Natural grassland)
CK	坡耕地 Slope cropland	1090~1117	梁坡中部 Slope-middle	10~12	—	农田 Farmland

1.4 数据处理

土壤碳、氮、磷储量(SOC, TN, TP stocks; C_s , N_s , P_s ; $Mg \cdot ha^{-1}$, 其中 Mg 为国际单位制 Megagram)计算公式分别如下^[2]:

$$C_s = SOC \times BD \times D/10 \quad (1)$$

$$N_s = TN \times BD \times D/10 \quad (2)$$

$$P_s = TP \times BD \times D/10 \quad (3)$$

式中, C_s 为土壤有机碳储量($Mg \cdot ha^{-1}$), SOC 为土壤有机碳含量($g \cdot kg^{-1}$), BD 为土壤容重($g \cdot cm^{-3}$), D 为土层厚度(cm), N_s 为土壤全氮储

量($Mg \cdot ha^{-1}$), TN 为土壤全氮含量($g \cdot kg^{-1}$), P_s 为土壤全磷储量($Mg \cdot ha^{-1}$), TP 为土壤全磷含量($g \cdot kg^{-1}$)。

每个沟谷地的数据为 50 个样品的平均值, 沟谷地每个坡位的数据为 10 个样品的平均值, 对照坡耕地农田的数据为 3 个样品的平均值, 进行单因素方差分析(ANOVA); 为探讨沟谷地土壤碳氮磷含量和储量与其他因子间的相关关系, 研究结合该样点的已发表数据进行相关分析和线性回归分析^[14], 所有分析均采用 SPSS 17.0 软件进行。

表 2 沟谷地和沟谷地坡位间的土壤性质的单因素方差分析

Table 2 One-way analysis of variance (ANOVA) for soil properties in 0~20 cm soil layers among gullies ($n=3$) and gully position ($n=5$)

土壤指标 Soil Properties	沟谷地 Gullies			沟谷地坡位 Gully positions		
	df	F	sig. (P)	df	F	sig. (P)
有机碳 SOC	2	1.046	0.354	4	5.184	0.001**
全氮 TN	2	0.327	0.722	4	4.815	0.001**
全磷 TP	2	3.102	0.048*	4	7.272	0.000**
碳储量 C_s	2	0.991	0.374	4	6.705	0.000**
氮储量 N_s	2	0.304	0.738	4	6.530	0.000**
磷储量 P_s	2	2.414	0.093	4	6.008	0.000**

注: ** 表示 $P < 0.01$ 显著相关, * 表示 $P < 0.05$ 显著相关。下同

Note: ** Significant correlation at $P < 0.01$. * Significant correlation at $P < 0.05$. The same as below

2 结果与分析

2.1 沟谷地间土壤碳氮磷元素含量的差异

沟谷地间土壤变量进行单因素方差分析结果显示, 不同植被恢复模式沟谷地间土壤 TP 含量存在显著差异, 其他变量差异均不显著(表 2); 但与坡耕地对照相比, 不同植被恢复模式沟谷地的土壤 C, N 元素的含量和储量表现出显著的提高, 而土壤 P 元素的含量和储量表现为略有降低(图 1)。其中, 对沟谷地土壤 SOC 储量(C_s)的增幅分别可达 82.5%(G-Rp), 94.9%(G-Ck)和 93.1%(G-Ng), 对沟谷地土壤 TN 储量(N_s)的增幅分别可达

40.7%(G-Rp), 46.0%(G-Ck)和 43.8%(G-Ng); 这主要由于植物具有固定大气中的二氧化碳和氮气(尤其是豆科植物及菌根宿主)的生态功能^[18]。然而, 不同植被恢复模式对沟谷地土壤 TP 储量略有减少, 且柠条灌丛沟谷地与对照和刺槐林沟谷地间存在显著差异($P < 0.05$); 这可能主要是因为植被恢复可以提高土壤 P 元素矿化水平, 土壤 P 元素由于植物吸收利用而转移并储存到地上和地下植物的有机体内。总体上, 黄土丘陵区沟谷地经过 20 年左右植被恢复, 不同植被恢复模式对沟谷地土壤 C, N, P 全量和储量的影响差异基本不显著; 但相对于对照坡耕地的土壤条件, 植被恢复对沟谷地土壤 C,

N 含量及其储量发挥着显著的改善作用,增加了土

壤的碳汇和氮素养分的效果。

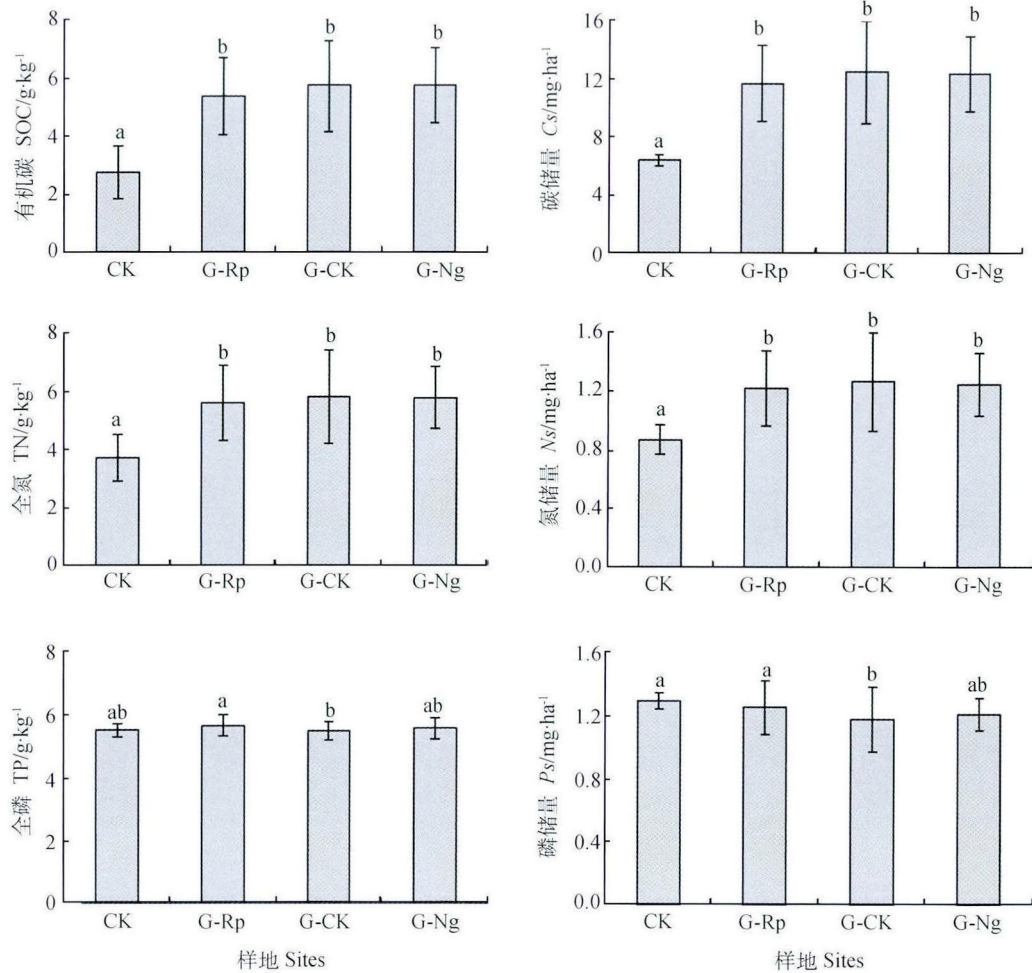


图 1 3 种植物恢复模式沟谷地土壤有机碳、全氮和全磷含量及其储量的变化

Fig.1 SOC, TN, TP contents and Cs, Ns, Ps of three vegetation restoration gully areas

2.2 沟谷地土壤碳氮磷元素含量的分布特征

沟谷地不同坡位上土壤的 C, N, P 的全量和储量均存在极显著的差异 ($P < 0.01$, 表 2)。3 种不同植被恢复模式沟谷地土壤 C, N 全量和储量, 总体, 随地势降低呈增加的趋势, 且 G-Ck 和 G-Ng 沟道在沟底含量为最高; 但在 G-Rp 沟底的分布表现出不同于地形主导的趋势, 略低于沟坡下部; 且总体土壤 P 元素受地形影响不明显 (图 2)。表明地形是沟谷地土壤养分因子空间分布的重要主导因素, 同时, 由于不同植被类型生物学特性 (群落组成、根系分布、冠层结构等) 的差异, 沟谷地上不同植被类型的土壤养分因子空间分布可能在作用机制上存在差异^[14]。

2.3 沟谷地土壤碳氮磷含量与其他养分和地形因子的相关关系

对沟谷地 0~20 cm 土层中土壤 SOC, TN 和

TP 的含量和储量与其他养分指标和地形因子 (坡度和坡位, 二者为对应调查样方的实测值) 进行相关分析 (表 3) 的结果表明: 沟谷地地貌单元上, SOC, TN 和 TP 的含量和储量与土壤 NO_3^- , AK, pH, 坡度和坡位间均存在极显著的相关关系 ($P < 0.01$), 且不同元素间, SOC 与 TN 间的相关系数最大; 另外, TP 的含量和储量与 AP 呈极显著的相关关系 ($P < 0.01$), 这可能意味着不同植被恢复模式沟谷地土壤有效磷与全磷间的含量动态联系密切。

2.4 沟谷地土壤碳氮磷元素间的线性回归关系

如图 3 所示, SOC 与 TN ($R^2 = 0.5424$), Cs 与 5 ($R^2 = 0.4992$) 存在极显著的线性回归关系 ($P < 0.0001$); SOC 与 TP ($R^2 = 0.1008$) 存在极显著线性回归关系 ($P < 0.0001$), 而 Cs 与 Ps ($R^2 =$

0.0180)的线性回归关系不显著;总体上,土壤碳氮元素间的线性回归关系最好,表明二者在植被恢复

过程中存在着紧密的协同作用。这一结果与已有研究结果较为一致^[6]。

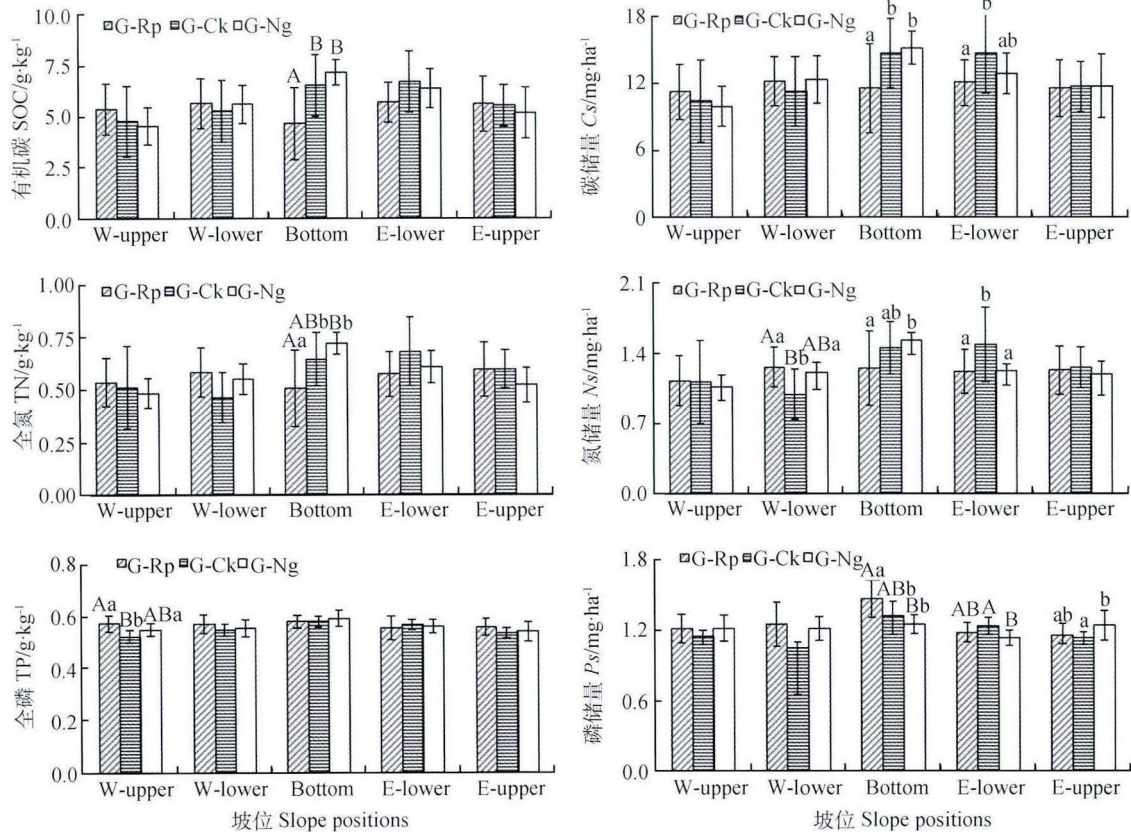


图 2 不同植被恢复模式沟谷地坡位上土壤有机质、全氮和全磷含量及其储量的变化

Fig. 2 SOC, TN and TP dynamics along gully positions in three vegetation restoration gully areas

表 3 沟谷地土壤碳氮磷含量和储量与土壤其他养分因子及地形因子的相关关系(n=150)

Table 3 Correlations between contents and storages of soil CNP and soil nutrients or topography factors (n=150)

	全氮 TN	全磷 TP	碳储量 C_s	氮储量 N_s	磷储量 P_s	硝态氮 NO_3^-	铵态氮 NH_4^+	有效磷 AP	有效钾 AK	pH	坡度 Gradient	坡位 Position
有机碳 SOC	0.737**	0.317**	0.947**	0.651**	-0.126	0.430**	0.210*	0.066	0.669**	-0.401**	-0.156	-0.183**
全氮 TN		0.321**	0.681**	0.939**	-0.098	0.450**	0.174*	0.038	0.647**	-0.356**	-0.172*	-0.216**
全磷 TP			0.339**	0.342**	0.588**	0.317**	-0.157	0.310**	0.461**	-0.365**	-0.317**	0.003
碳储量 C_s				0.707**	0.134	0.385**	0.183*	0.117	0.640**	-0.396**	-0.251**	-0.172**
氮储量 N_s					0.182*	0.407**	0.137	0.090	0.611**	-0.346**	-0.272**	-0.202**
磷储量 P_s						0.014	-0.222**	0.343**	0.094	-0.141	-0.413**	0.054

3 讨论

黄土高原退化土地实施植被恢复是控制水土流失、改善生态环境条件的主要策略之一。黄土高原有着自然生态系统脆弱、地貌沟壑纵横、

空间异质性高的环境特征^[21]。沟谷地是黄土高原地区一个重要地形因子,约占该地区总面积的42%^[22]。已有研究表明,在沟谷地进行植被恢复可以显著地减少沟道侵蚀、提高植物生物多样性,改善土壤条件^[14,17,23]。因此,有必要进一步

加强沟谷地内重要的生态因子及其过程的时空

变异的研究。

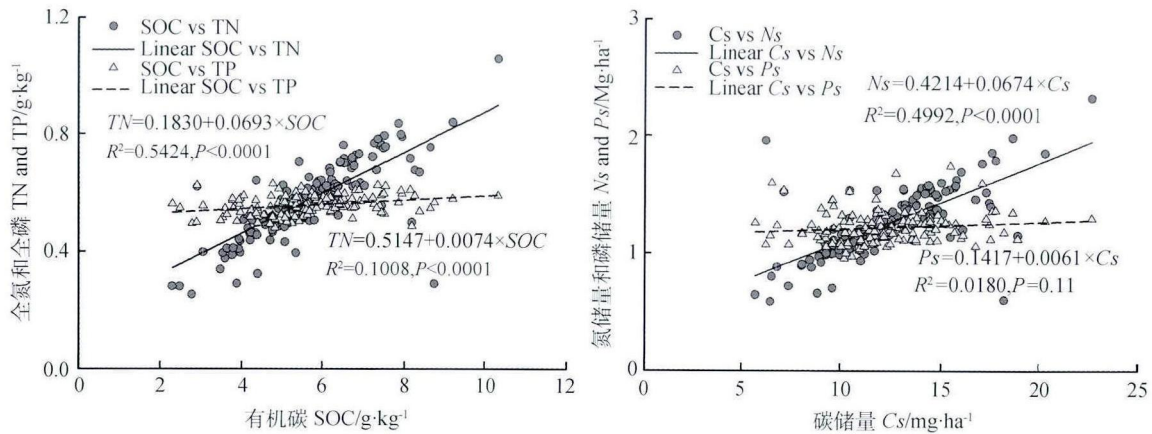


图 3 沟谷地土壤 SOC 与 TN 和 TP, Cs 与 Ns 和 Ps 间的线性回归关系

Fig. 3 Linear regression relationship between SOC related to TN and TP, SOC storages related to TN storages and TP storages in the gully areas

黄土丘陵区沟谷地的植被恢复主要包括斑块状分布的人工种植林和自然恢复的形成的天然植被。研究选取的刺槐和柠条是黄土高原的植被恢复过程中主要应用的 2 个树种。刺槐是一种来自北美的豆科落叶木本树种,由于它有生长快、木材质量好、耐旱和固氮等优良特性,这一外来先锋树种在黄土高原造林工程得到广泛种植。此外,柠条作为多年生的豆科落叶灌木树种,由于其具有抗旱、快速的发芽和生长率、固氮等优良特性,这一种乡土先锋植物也被广泛的应用于我国沙漠、半沙漠和黄土高原等地区的植被建设中。目前,刺槐和柠条的种植对防治黄土高原地区的土壤侵蚀和土地退化发挥着重要作用,而且显著地提高了土壤肥力。由于沟谷地可以为植被生长提供较好的土壤养分和水分条件,研究沟谷地内的刺槐和柠条树种均长势良好,能够适宜沟谷地立地条件,发挥着良好的固碳和固氮功能,对改善环境发挥着重要的积极作用。本研究表明,3 种植物恢复模式均可以显著地提高土壤 C, N 元素含量和储量,空间分布上受地形和植被的主导作用存在一定差异。

研究不同的植被恢复模式代表着乔、灌、草 3 种植物类型,彼此间的生物学特性方面有明显差异,但在经过 20 年左右植被恢复后,不同恢复模式沟谷地间土壤的 SOC, TN, TP 差异却基本不显著。其中可能原因是由于草本植物相对于树木,具有相对较短的生命周期,因此表层土壤中的 C, N 元素可随草本植物叶片和根系的周转而有利于在土壤中累积;而刺槐和柠条人工林均为多年生木本植物,它们在长期的积累过程中形成了较高的生物量和凋落物,

不断地存储大量的 C 和 N 于有机体内部。而且刺槐和柠条叶片和凋落物中的 C, N 含量也是显著高于草本植物。因此,尽管柠条和刺槐都为豆科植物,但在 20 年的恢复时间尺度内,土壤中 C, N 元素的含量和储量与天然草地间却不存在显著差异。另外,从土壤 P 元素来看,刺槐和柠条恢复沟谷地略低于天然草地,这也可能主要与植被的有机体储存有关。

黄土丘陵区经过 20 年左右植被恢复的沟谷地地貌单元上,灌木和草本群落的土壤 C, N 含量及其储量的空间变异还主要受到地形因子(如坡位和坡向)的媒介作用;与前二者相比,森林群落的土壤 C, N 全量和储量的空间变异的主导因子可能发生改变,乔木群落的结构(如冠层结构)和功能可能是沟谷地土壤 C, N, P 全量和储量分布的主导因素^[14]。这种差异的可能原因是黄土丘陵区沟谷地多为 > 20° 的陡坡,这种地形特征显著影响水、热、光照等小气候条件,进而影响着一些植物的生长和分布;因此,草灌阶段的植物群落的地表土壤可能还是主要受地形因素的影响^[19-20]。然而,乔木群落有着较好的冠层结构,对群落的水、热、光照等小气候条件,土壤侵蚀,以及林下植被群落均产生的重要影响,这种影响可能已超过了立地条件中地形的媒介作用。由此可见,不同植被恢复模式沟谷地土壤变量空间上变异可能存在不同的作用机制^[14]。

4 结论

3 种植物恢复模式均显著地提高了沟谷地土壤

C、N元素含量和储量,对提高区域土壤碳汇功能和改善土壤氮素养分具有着重要的积极作用;3种植被恢复模式对沟谷地土壤P元素含量和储量略有降低的作用,植物有机体内储存与利用可能是土壤P元素降低的重要方面。

沟谷地土壤C、N、P元素含量和储量的空间分布主要受到地形因素的主导,总体表现出随地势的降低而增加的趋势(刺槐林恢复的沟底除外);沟谷地上不同植被类型的土壤养分因子空间分布可能在作用机制上存在差异,尤其存在于乔木与灌草植被类型间。

沟谷地土壤C、N间存在着极显著的线性回归关系($P < 0.0001$),表明二者在植被恢复过程中的协同效应密切,且可以通过建立模型进行彼此的预测。

致谢:野外实验承蒙中国科学院安塞水土保持生态试验站的大力支持,在此表示诚挚的谢意。

参考文献

- [1] Wang Y, Zhang X, Huang C. Spatial variability of soil total nitrogen and soil total phosphorus under different land uses in a small watershed on the Loess Plateau, China [J]. *Geoderma*, 2009, 150(1/2): 141-149
- [2] Wei X, Shao M, Fu X, *et al.* Distribution of soil organic C, N and P in three adjacent land use patterns in the northern Loess Plateau, China [J]. *Biogeochemistry*, 2009, 96(1/3): 149-162
- [3] Macedo M O, Resende A S, Garcia P C, *et al.* Changes in soil C and N stocks and nutrient dynamics 13 years after recovery of degraded land using leguminous nitrogen-fixing trees [J]. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255(5/6): 1516-1524
- [4] Liu Z P, Shao M A, Wang Y Q. Spatial patterns of soil total nitrogen and soil total phosphorus across the entire Loess Plateau region of China [J]. *Geoderma*, 2013, 197(1): 67-78
- [5] 程积民, 万惠娥, 胡相明. 黄土丘陵区植被恢复重建模式与演替过程研究[J]. *草地学报*, 2005, 13(4): 324-327
- [6] Deng L, Shangguan Z P, Sweeney S. Changes in Soil Carbon and Nitrogen following Land Abandonment of Farmland on the Loess Plateau, China [J]. *Plos One*, 2013, 8(8): e71923
- [7] Fu B J, Meng Q H, Qiu Y, *et al.* Effects of land use on soil erosion and nitrogen loss in the hilly area of the Loess Plateau, China [J]. *Land Degradation & Development*, 2004, 15(1): 87-96
- [8] Jiao J Y, Zhang Z G, Bai W J, *et al.* Assessing the Ecological Success of Restoration by Afforestation on the Chinese Loess Plateau [J]. *Restoration Ecology*, 2012, 20(2): 240-249
- [9] 许明祥, 王征, 张金, 等. 黄土丘陵区土壤有机碳固存对退耕还林草的时空响应[J]. *生态学报*, 2012, 32(17): 5405-5415
- [10] Chen H, Cai Q G. Impact of hillslope vegetation restoration on gully erosion induced sediment yield [J]. *Science in China Series D-Earth Sciences*, 2006, 49(2): 176-192
- [11] 张健, 刘国彬, 许明祥, 等. 黄土丘陵区沟谷地植被恢复群落特征研究[J]. *草地学报*, 2008, 16(5): 485-490
- [12] Qiu L P, Zhang X C, Cheng J M, *et al.* Effects of black locust (*Robinia pseudoacacia*) on soil properties in the loessial gully region of the Loess Plateau, China [J]. *Plant and Soil*, 2010, 332(1/2): 207-217
- [13] Wei X R, Shao M A, Zhang X C, *et al.* Landform affects on profile distribution of soil properties in black locust (*Robinia pseudoacacia*) land in loessial gully region of the Chinese Loess Plateau and its implications for vegetation restoration [J]. *African Journal of Biotechnology*, 2009, 8(13): 2984-2992
- [14] Xu M, Zhang J, Liu G B, *et al.* Soil properties in natural grassland, *Caragana korshinskii* planted shrubland, and *Robinia pseudoacacia* planted forest in gullies on the hilly Loess Plateau, China [J]. *Catena*, 2014, 119: 116-124
- [15] 焦峰, 温仲明, 李锐. 黄土丘陵区(安塞)县域尺度土地类型结构评价[J]. *水土保持研究*, 2005, 12(1): 30-31, 131
- [16] 周德成, 赵淑清, 朱超. 退耕还林工程对黄土高原土地利用/覆被变化的影响: 以陕西省安塞县为例[J]. *自然资源学报*, 2011, 26(11): 1866-1878
- [17] 张健, 刘国彬. 黄土丘陵区不同植被恢复模式对沟谷地植物群落生物量和物种多样性的影响[J]. *自然资源学报*, 2010, 25(2): 207-217
- [18] Zhang J, Taniguchi T, Tateno R, *et al.* Ectomycorrhizal fungal communities of *Quercus liaotungensis* along local slopes in the temperate oak forests on the Loess Plateau, China [J]. *Ecological Research*, 2013, 28(2): 297-305
- [19] Suggitt A J, Gillingham P K, Hill J K, *et al.* Habitat microclimates drive fine-scale variation in extreme temperatures [J]. *Oikos*, 2011, 120(1): 1-8
- [20] Hwang T, Song C H, Vose J M, *et al.* Topography-mediated controls on local vegetation phenology estimated from MODIS vegetation index [J]. *Landscape Ecology*, 2011, 26(4): 541-556
- [21] Tang G A, Li F Y, Liu X J, *et al.* Research on the slope spectrum of the Loess Plateau [J]. *Science in China Series E-Technological Sciences*, 2008, 51(1): 175-185
- [22] Zheng J Y, Wang L M, Shao M A, *et al.* Gully impact on soil moisture in the gully bank [J]. *Pedosphere*, 2006, 16(3): 339-344
- [23] Gyssels G, Poesen J, Bochet E, *et al.* Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water: A review [J]. *Progress in Physical Geography*, 2005, 29(2): 189-217

(责任编辑 刘云霞)