

植被恢复和覆土厚度对砒砂岩区土壤水分及养分的影响

张鹤^{1,2}, 费洪岩^{1,2}, 韩凤朋^{1,2,3,4}, 王钰^{1,2}, 潘若鹏^{1,2}, 毕博远^{1,2}

(1.西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2.中科院水利部

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; 3.中科院水利部

水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 4.中科院水利部 水土保持生态工程技术研究中心, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 研究植被恢复对砒砂岩区土壤水分和养分的影响状况, 明确对于砒砂岩地区土壤保水保肥效果最佳的植被恢复类型, 为砒砂岩区的生态修复和区域水土流失治理提供理论依据。[方法] 选取准格尔旗暖水乡裸露砒砂岩向覆土砒砂岩过渡区域, 以黄土—砒砂岩交界带不同人工恢复植被和自然恢复草地的土壤为研究对象, 测定土壤水分和养分含量, 分析不同植被恢复和覆土厚度对砒砂岩区土壤水分和养分特征的影响(其中天然草地作为对照)。[结果] ①裸露砒砂岩向覆土砒砂岩过渡区域土壤水分含量主要受黄土厚度影响, 黄土的持水性能优于砒砂岩土壤, 养分含量主要受植被恢复类型影响; ②研究区土壤各指标均属于中等变异程度, 其中土壤水分、碳、氮含量自北向南随覆土厚度增加逐渐增加, 磷素分布则相反; ③对比天然草地, 沙棘和油松恢复对砒砂岩区土壤碳、氮含量的提升效果最好, 土壤有机质含量分别提高了 43.12% 和 34.27%, 全氮提高了 78.95% 和 42.11%, 铵态氮提高 25.64% 和 46.15%, 硝态氮提高 69.44% 和 42.22%。其中油松恢复下土壤水分含量高于天然草地 54.55%, 但人工植被恢复后的土壤磷素水平并没有提升。[结论] 黄土较砒砂岩土壤持水能力更好, 二者界面对水分下渗以及下层水分向上损失起到一定阻挡作用, 因此砒砂岩区土壤水分改善方面可以考虑覆土层的蓄水保水能力。在进行人工植被恢复时, 推荐种植沙棘和油松, 可提升区域土壤水分、碳、氮含量, 保水保肥能力较好。

关键词: 砒砂岩区; 植被恢复; 土壤水分; 土壤养分

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)02-0098-09

中图分类号: S153

文献参数: 张鹤, 费洪岩, 韩凤朋, 等. 植被恢复和覆土厚度对砒砂岩区土壤水分及养分的影响[J]. 水土保持通报, 2022, 42(2): 98-106. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.02.014; Zhang He, Fei Hongyan, Han Fengpeng, et al. Effects of vegetation restoration and soil thickness on soil moisture and nutrient in feldspathic sandstone area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(2): 98-106.

Effects of Vegetation Restoration and Soil Thickness on Soil Moisture and Nutrient in Feldspathic Sandstone Area

Zhang He^{1,2}, Fei Hongyan^{1,2}, Han Fengpeng^{1,2,3,4}, Wang Yu^{1,2}, Pan Ruopeng^{1,2}, Bi Boyuan^{1,2}

(1.College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Ministry of Water Resources,

Chinese Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3.Institute of Soil and Water Conservation, Ministry of Water Resources, Chinese Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4.Soil and Water Conservation Ecological Engineering Technology Research Center, Ministry of Water Resources, Chinese Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] The effects of vegetation restoration on soil moisture and nutrients were studied, and the type of vegetation restoration that has the best effect on soil water and fertilizer conservation was clarified, in order to provide theoretical basis for the ecological restoration and regional soil erosion control of the feldspathic sandstone area. [Methods] The transition area between exposed feldspathic sandstone and soil-covered feldspathic sandstone in Nuanshui Township, Jungar Banner of Inner Mongolia was selected as the study area, and soils of different artificially restored vegetation and naturally restored grassland in loess-

收稿日期: 2021-09-08

修回日期: 2021-11-17

资助项目: 国家重点研发计划项目“不同类型退化植被恢复重建技术”(2017YFC0504504); 国家重点研发计划项目(2016YFA0600801)

第一作者: 张鹤(1998—), 女(汉族), 陕西省渭南市人, 硕士研究生, 研究方向为土壤环境化学。Email: ZhangH72304@163.com。

通讯作者: 韩凤朋(1980—), 男(汉族), 山东省日照市人, 博士, 副研究员, 博士生导师, 主要从事土壤环境化学与水土保持研究。Email: hanxiangzi007@163.com。

feldspathic sandstone boundary area were taken as the research object. The content of soil water and nutrients were measured, and the effects of different vegetation restoration and soil thickness on the characteristics of moisture and nutrient in the feldspathic sandstone area were analyzed with natural grassland as control. [Results] ① The soil moisture content in the transition zone from exposed feldspathic sandstone to soil-covered feldspathic sandstone was mainly affected by the thickness of loess. The water holding capacity of loess soil was better than that of feldspathic sandstone soil, and nutrient contents were mainly affected by vegetation restoration types. ② The soil indexes in the study area were of medium variation, in which the contents of soil moisture, carbon and nitrogen increased gradually with the increase of soil thickness from north to south, while the distribution of phosphorus was opposite. ③ Compared with natural grassland, the restoration of *Hippophae rhamnoides* and *Pinus tabulaeformis* has the best effect on improving the content of soil carbon and nitrogen in feldspathic sandstone area. The content of soil organic matter increased by 43.12% and 34.27%, total nitrogen increased by 78.95% and 42.11%, ammonium nitrogen increased by 25.64% and 46.15%, and nitrate nitrogen increased by 69.44% and 42.22%, respectively. Among them, the content of soil moisture under the restoration of *Pinus tabulaeformis* was higher than that of natural grassland by 54.55%, but the soil phosphorus level did not increase after artificial vegetation restoration. [Conclusion] Loess has better water-holding capacity than feldspathic sandstone soil, and the interface between the two has a certain barrier effect on the infiltration of water and the upward loss of water in the lower layer. Therefore, the water-storage and water-retention capacity of the overlying soil can be considered in the improvement of soil moisture in feldspathic sandstone area. During the restoration of artificial vegetation, it is recommended to plant *Hippophae rhamnoides* and *Pinus tabulaeformis*, which can improve the soil moisture, carbon, and nitrogen content, as they have better water and fertilizer retention capacity.

Keywords: feldspathic sandstone area; vegetation restoration; soil moisture; soil nutrients

土地退化作为国内外关注的生态环境问题之一,众多学者在该领域进行了大量研究,其中,土壤侵蚀是造成土地退化的主要原因之一^[1-3]。砒砂岩指位于黄河中游地区、出露于黄土高原北部的中生代沉积岩,是一种发育不充分的特殊泥岩、泥沙岩^[4-6],主要分布在以鄂尔多斯市准格尔旗为中心的晋陕蒙三省区交界地带,分布面积达 $1.67 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[7-8]。根据其地表覆盖物类型的不同可分为覆土、覆沙和裸露砒砂岩。由于砒砂岩具有沙粒间胶结程度差、结构强度低等特点^[9-11],岩层极易发生侵蚀,平均土壤侵蚀模数为 $3.00 \times 10^4 \text{ t/km}^2$,水土流失十分严重^[12-13],多年平均输沙量高达 $1.61 \times 10^8 \text{ t/a}$,是造成黄河下游河道淤积的主要原因^[14-15],对黄河中下游生态环境安全具有严重威胁。植被—土壤是生态系统水分养分循环的重要环节,两者之间进行频繁的物质交换,相互影响^[16],土壤促进植被生长,植被对土壤有保护改良作用^[17-18]。土壤为植被提供生长所需的水分和养分,直接影响林木的生长、植被群落结构等^[19-21],同时植被所产生的枯落物层的腐化以及分解可以促进其下土壤营养元素的循环^[22],改善土壤的理化性质,有效抵抗土壤侵蚀,对土壤功能效应的发挥起到关键作用^[23]。采取植被生态工程是控制土壤侵蚀最基本的方法,可以获得良好的生态环境。张祎、何群等学者

的研究结果均表明植被是影响土壤性质的重要因素,植被恢复对土壤碳、氮、磷等理化性质及微生物性质都有明显改善,在提高土壤有机碳、氮储量和稳定土壤结构方面都有着重要的作用,并且随着恢复年限的增加改善效果更强,有利于土壤生态功能的恢复^[24-30]。基于以上情况,为更加科学有效地推进砒砂岩地区的水土流失治理,减少入黄泥沙,植被恢复成为砒砂岩区土壤质量维系、生态环境改善的有效方式,研究该地区植被恢复后土壤水分和养分状况,对改善该区域土壤性质和结构,维持区域生态平衡有着重要的实践意义。在砒砂岩区水土保持生态工程建设的诸多研究中,大多是在单一类型区域内进行研究^[13,31-32],植被恢复方面也多集中于沙棘生态工程^[4,33-35]。然而,砒砂岩地区人工林多为物种单一、结构简单的生态系统,存在植被类型少、树种难以自我更新等方面的问题,并且在侵蚀潜力很强的裸露至覆土砒砂岩过渡带的研究较少,对该区域不同植被恢复情况下土壤水分和养分特征方面的分析较为薄弱,造成该地区在选择适宜生长并能保持土壤水肥功能的植被类型时缺乏理论依据。因此,目前亟需了解砒砂岩地区黄土—砒砂岩过渡带植被恢复下土壤水分和养分差异状况,以期提高植被恢复的有效性,为砒砂岩地区的科学研究和生态恢复提供基本的数据参

考及理论基础,使砒砂岩地区恢复治理工作持续开展。基于以上背景,本文选取黄土—砒砂岩过渡带山杏(*Armeniaca sibirica*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、山桃(*Amygdalus davidiana*)、油松(*Pinus tabuliformis*)4种不同植被为研究对象,以天然草地(Natural grassland)为对照,对各植被下土壤的水分养分状况进行分析,对比研究区内水分养分的空间变化,旨在明确裸露向覆土砒砂岩过渡带土壤水分和养分的显著影响因子,砒砂岩区5种不同植被恢复下土壤的水分养分差异状况。以及砒砂岩区土壤保水保肥效果最佳的植被恢复类型,以期对砒砂岩区生态修复和区域水土流失治理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区鄂尔多斯市准格尔旗暖水乡,地处鄂尔多斯高原东部,属黄河中游段,地貌主要以丘陵沟壑为主,包括裸露砒砂岩区和覆土砒砂岩区,地理坐标为 $110^{\circ}36.043\ 2'$ — $110^{\circ}36.095\ 1'E$, $39^{\circ}47.199\ 2'$ — $39^{\circ}47.246\ 5'N$,平均海拔1 213 m,年平均气温 $6.2\sim 8.7\ ^{\circ}C$,降水少而集中,多集中于7—9月,年均降水量400 mm,年均潜在蒸发量2 093 mm^[32,36]。研究区处于裸露砒砂岩向覆土砒砂岩过渡区域,土壤基质以砒砂岩和黄土为主,区域内黄土覆盖厚度不同,表层为黄土,深层多为白色砒砂岩。目前该区人工恢复植被主要包括山杏(V_1)、沙棘(V_2)、山桃(V_3)、油松(V_4),植被生长状况良好,自然恢复以草地为主,其中草本植物包括鼠尾粟(*Sporobolus fertilis*)、草木樨(*Melilotus officinalis*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)等。本文以天然草地(CK)土壤做对照,其余4种人工植被土壤作为研究对象。植被类型分布及采样点如图1所示。

1.2 样点布置及采样

2019年7月进行野外调查及采样,采样前无降水等自然因素或人为干扰影响。采样位置处于什巴

尔大沟坡顶塬面,塬面坡度约为 $3^{\circ}\sim 5^{\circ}$,自2013年进行人工植被恢复措施。区域整体植被盖度约85%左右,其中多以自然恢复的草本植物为主,人工恢复植被交错排列(图1),按照一定行距种植。综合研究区地形和植被分布特征,共设取样点16个。在自然恢复区域内选取草本植物盖度相对最大且周边无人工恢复植被的样地”改为在自然恢复区域内选取草本植物盖度相对最大的样地作为天然草地样点(见图1)。在研究区域内均匀布点,用手持GPS记录样点坐标,并详细记录样点处植被类型、海拔、株高、行距等信息。样地植被基本信息详见表1。研究区既包括覆土厚度为0 cm的裸露砒砂岩区,也包括黄土厚度在100 cm左右的区域,而砒砂岩结构坚硬取样难度较大,因此将采样深度统一设为100 cm。在确定采样点大概位置后,距该点植被大约1 m处用土钻采集土壤样品,每个样点3个重复。采样前除去表层枯枝落叶等杂物,分6层采样:0—10,10—20,20—40,40—60,60—80,80—100 cm,每层混合均匀后取适量装小铝盒用于含水量的测定,其余带回实验室,共计288个土壤样本。待自然风干,分3份分别过2,1和0.25 mm筛,备用。

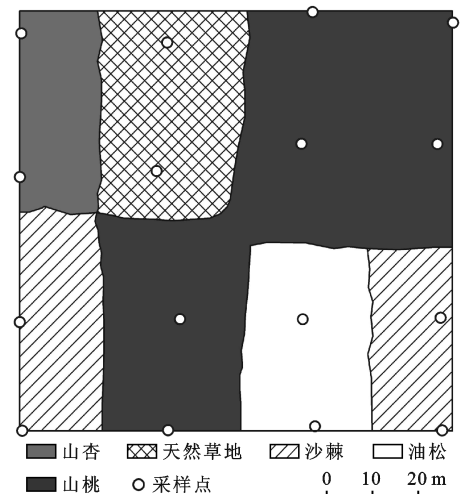


图1 研究区植被类型和采样点分布

表1 研究样地基本概况

恢复过程	编号	植被类型	恢复年限/a	样点数	坡度/($^{\circ}$)	平均树高/m	盖度、行距	土壤类型
自然恢复	CK	天然草地	—	2	3~5	—	盖度75%	砒砂岩、黄土
人工恢复	V_1	山杏	7	2	3~5	1.7	2 m×2 m	砒砂岩、黄土
	V_2	沙棘	7	4	3~5	1.5	50 cm×50 cm	砒砂岩、黄土
	V_3	山桃	7	6	3~5	1.8	2 m×2 m	砒砂岩、黄土
	V_4	油松	7	2	3~5	1.6	2 m×2 m	砒砂岩、黄土

1.3 测定方法

对从野外所采集土壤样品的土壤水分、颗粒组成、pH值、有机质含量(OM)、全氮含量(TN)、铵态

氮含量(NH_4^+-N)、硝态氮含量($NO_3^- -N$)、全磷含量(TP)以及速效磷含量(AP)这9种理化性质进行了测定^[37]。具体测定方法详见表2。

1.4 统计分析

运用 Excel 2010 软件进行数据分析以及图表的制作, 结合 SPSS 22 进行最小显著性检验(LSD)及双因素方差分析(two-way ANOVAs), 数据结果以平均值±标准误表示, 利用 ArcGIS 10.2 绘制植被及采样点分布图。

2 结果与分析

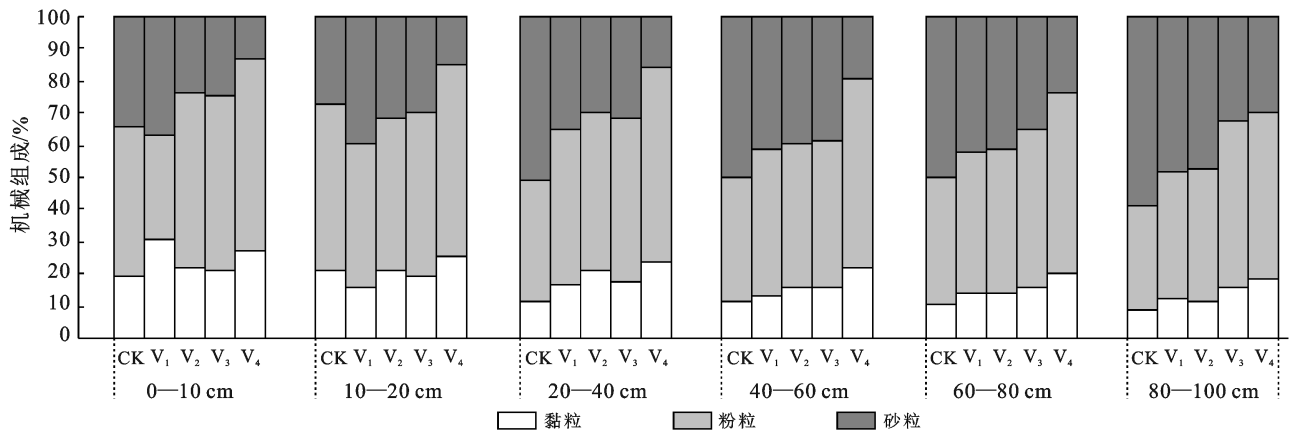
2.1 植被类型和覆土厚度对土壤水分的影响

2.1.1 不同土壤基质对水分的影响 由图 2 可知, 5 种植物恢复下不同深度的土壤粒径分布情况中, 粉粒(0.002~0.05 mm)变化较小, 砂粒(0.05~2 mm)和黏粒(<0.002 mm)差异显著, 而且, 砂粒含量随深度

增加而增加。砒砂岩比较坚硬, 粒径大, 土壤结构差, 而黄土的黏粒含量更大, 两者土壤机械组成的不同是造成持水能力差异的主要原因。

表 2 土壤样品选定指标的测定方法

指标	测定方法
水分	烘干法
颗粒组成	马尔文激光粒度仪分析
pH 值	水土比 2.5:1 电极法
有机质	重铬酸钾容量法
全氮	全自动凯氏定氮法
速效氮	KCl 浸提法
全磷	钼锑抗比色法
速效磷	NaHCO ₃ 浸提—钼锑抗比色法



注: CK 代表天然草地; V₁ 代表山杏; V₂ 代表沙棘; V₃ 代表山桃; V₄ 代表油松

图 2 研究区 5 种植物恢复类型下各土层土壤颗粒组成分布

研究区北部多为裸露砒砂岩区, 由北向南覆土厚度逐渐增加, 南部黄土厚度最大。研究区任一深度土壤水分含量均呈现由北向南逐渐增大的趋势, 与土壤基质的变化一致。由表 3 可知, 表层土壤水分含量平均 0.140 g/g, 高于深层 0.101 g/g, 垂直方向上黄土—砒砂岩界面上下土壤水分含量差异显著, 且由于二者界面多存在于 20—60 cm, 因此该深度范围内的土壤含水量变异系数也最大, 为 33.81%。80—100 cm 多为砒砂岩土壤, 持水能力相当, 变异系数最小。以上结果表明研究区黄土、砒砂岩两种颗粒组成不同的土壤基质是造成水分含量差异的主要影响因子, 且黄土的持水能力优于砒砂岩土壤。与双因素分析结果一致。

2.1.2 不同植被恢复下土壤水分差异状况 5 种植物恢复下土壤水分含量状况如图 3 所示。垂直方向上, 各深度的土壤含水量变化幅度较小, 草地和油松 40 cm 以下土壤水分含量显著低于 20 cm 以上 ($p < 0.05$), 山杏、沙棘和山桃土壤含水量在深度上无显著变化。对比天然草地, 处于黄土厚度较厚区域的

油松地不同剖面土壤水分含量都是最高的, 且整体含水量显著高于其余 4 种植物恢复类型, 较天然草地提高 54.55%。山杏、山桃和沙棘植被恢复下由于黄土厚度基本一致, 土壤含水量也无显著差异, 土壤水分整体比天然地高出 9.10% 左右。

表 3 区域土壤水分描述性统计

深度/cm	土壤含水量/(g·g ⁻¹)				
	最大值	最小值	平均值	标准差	变异系数/%
0—10	0.187	0.086	0.140	0.033	23.57
10—20	0.200	0.088	0.140	0.039	27.86
20—40	0.212	0.061	0.132	0.046	34.85
40—60	0.184	0.068	0.116	0.038	32.76
60—80	0.167	0.077	0.110	0.032	29.10
80—100	0.145	0.070	0.101	0.020	19.80

2.2 不同植被恢复对土壤养分的影响

植被类型和土壤基质双因素分析结果表明(图 4), 植被恢复对土壤养分含量变化影响达到极显著水平 ($p < 0.01$)。垂直方向上, 自然恢复和人工恢复植被下土壤的 OM, TN, NO₃⁻-N 和 AP 的含量均为表

层最高,且随土层深度增加而降低,呈现出明显的表层聚集效应。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TP 含量在深度上呈波浪形变化。土壤 OM 和 TN 相关性较高,含量、分布状况等具有一致性。各植被恢复下土壤 OM, TN 仅在 0—10 cm 土层存在显著差异 ($p < 0.05$),沙棘全土体土壤 OM, TN 含量分别为 10.54 和 0.61 g/kg,对比自然恢复的草地提高了 14.57%,69.44%,油松恢复下的土壤 OM, TN 分别为 11.32 和 0.60 g/kg,分别提高了 23.04%,66.67%。总体上,沙棘对砒砂岩区土壤的 OM 和 TN 含量恢复效果最好,油松次之。研究区土壤速效氮(available nitrogen, AN)含量普遍偏低, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的含量处于 1.38~3.72 mg/kg 之间, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量 0.85~8.40 mg/kg。0—20 cm 土层油松恢复下土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量最高,与其他植被类型差异明显 ($p < 0.05$),20—40 cm 由于沙棘的固氮作用

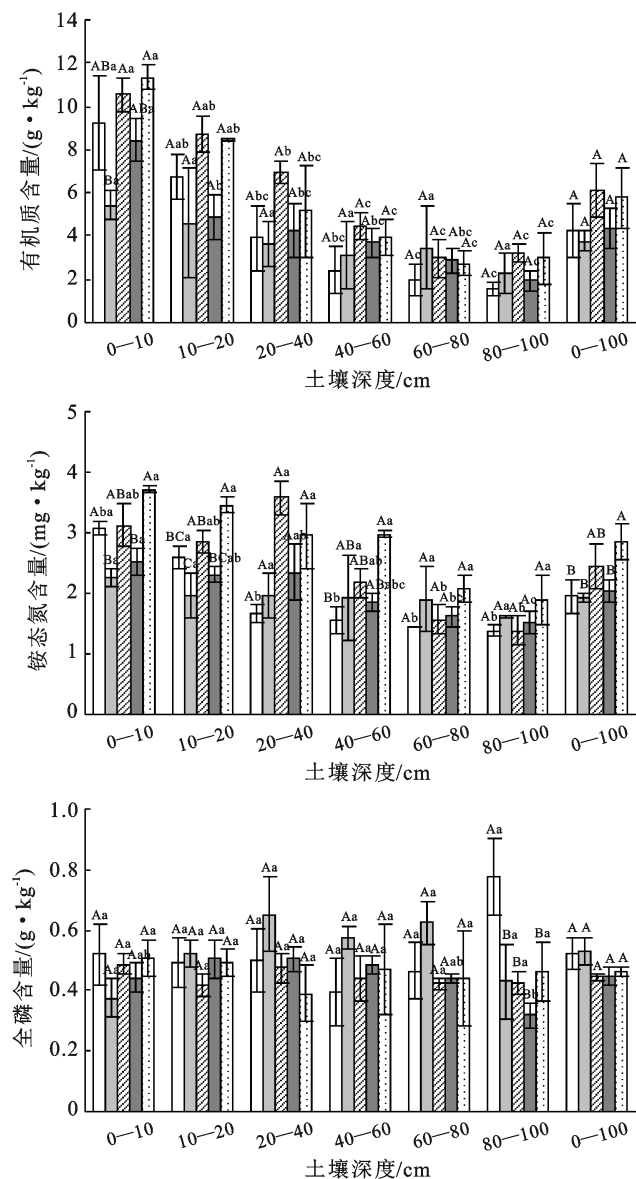
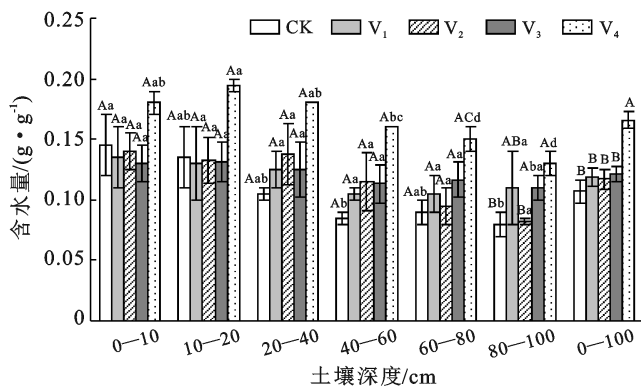


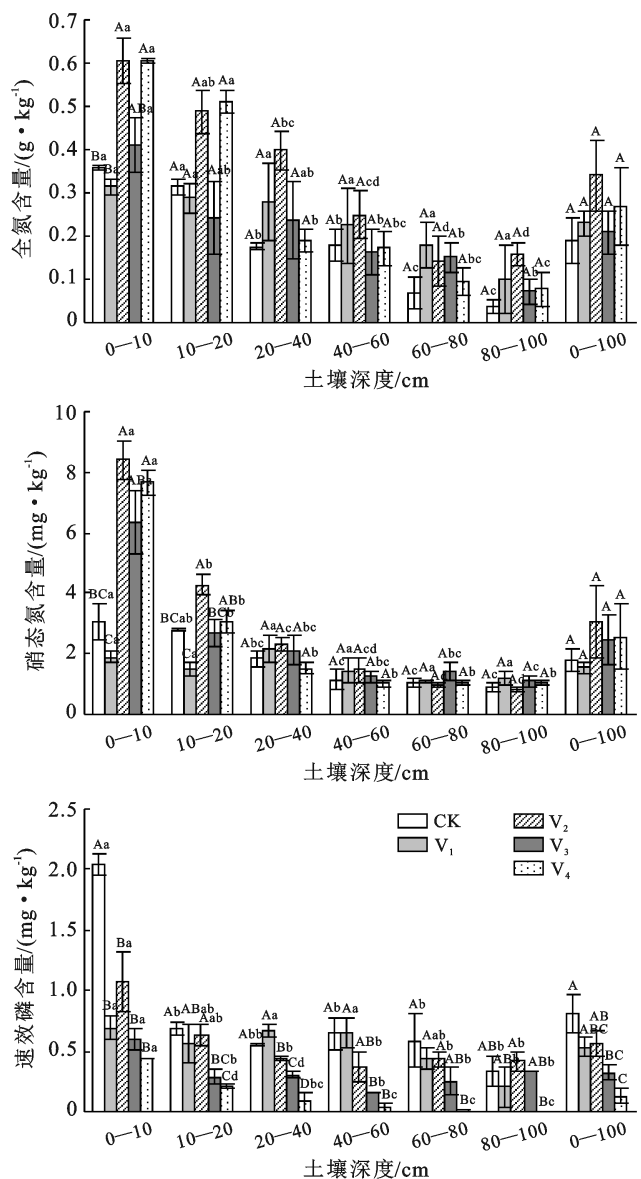
图 4 研究区 5 种植被恢复类型下土壤养分含量变化状况

导致其土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量最高,40 cm 以下依旧是油松土壤的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量最高。



注:不同大写字母代表同一深度不同植被之间的显著性差异,不同小写字母代表同一植被不同深度之间的显著性差异。下同

图 3 研究区 5 种植被恢复类型下土壤含水量变化状况



土壤 NO_3^- -N 含量在 20 cm 以上各植被间之间差异明显 ($p < 0.05$), 表现为沙棘和油松含量较高, 深层土壤 NO_3^- -N 含量差异不显著。与 OM 和 TN 结果一致, 油松和沙棘恢复对土壤 AN 的改善作用更明显, 与对照相比, 油松恢复下土壤的 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 含量总体分别提高 46.15% 和 42.22%, 沙棘提高 25.64% 和 69.44%。根据图 4 可知, 土壤 TP 含量普遍偏低, 80 cm 以下土壤 TP 含量表现为天然草地土壤 TP 含量显著高于人工恢复植被土壤 ($p < 0.05$), 80 cm 以上山杏恢复土壤 TP 含量略高, 但与其余差异并不显著。土壤 AP 含量偏低 (图 4), 处于 0~2.04 mg/kg 之间, 部分样点的 AP 含量低至无法检出, 在 0—10 cm 深度范围内草地 AP 含量显著高于其余 4 种人工恢复植被 ($p < 0.05$), 人工植被之间土壤 AP 含量差异并不显著, 其中处于覆土砒砂岩区的油松土壤 AP 含量极低。自然恢复的草地 AP 含量分别高出人工恢复植被 50%, 44.64%, 153.13%, 523.08%。以上结果表明, 植被恢复对砒砂岩区的土壤磷素状况无明显提升作用。

2.3 土壤养分空间变异分析

研究区土壤 pH 值均值为 8.84, 属于强碱性土壤。与含水量的变化相同, 北部裸露砒砂岩区土壤 OM, TN, NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 含量低, 自北向南含量逐渐增大, 呈现南高北低的趋势, 这一趋势在表层 (0—20 cm) 最为明显。20 cm 以下, 土壤 OM 和 TN 在西南方向的覆土砒砂岩区含量较高, NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 分布较为平均。磷素在研究区内的分布状况与 OM 等不同, 裸露砒砂岩区磷素含量高于覆土砒砂岩区, 由北向南呈现递减趋势。因此, 碳、氮的空间分布状况与土壤基质的变化具有一致性, 磷素相反, 进一步结合研究区的植被分布, 土壤 OM, TN, NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 含量较高区域为人工恢复的油松和沙棘所处位置, 磷素水平较高的区域为自然恢复的草地, 这与上述分析结果一致。垂直方向上, 由于表层受到植被凋落物的影响, 区域整体土壤养分呈现表聚现象, 深层含量较低。从表 4 可以看出, 除 AP 在 40—60 cm 变异系数为 106.26% 属于强变异外, 其余各养分指标在每一土层变异系数都处于 10%~100% 之间, 属于中等变异程度, 说明土壤基质对研究区土壤养分含量的影响不大, 受到生物因素如植被差异等的影响较大, 这与双因素的分析结果一致。各指标整体变异系数均值由小到大顺序为: $\text{TP} < \text{NH}_4^+$ -N < NO_3^- -N < OM < TN < AP, 分别为 28.20%, 32.16%, 38.48%, 42.80%, 61.52%, 83.47%。

3 讨论

3.1 植被类型和覆土厚度对土壤水分的影响

土壤水分是土壤肥力诸多因素中最活跃、最重要的指标, 也是半干旱地区生态系统可持续性的基础^[23]。土壤含水量可以综合体现土壤的孔隙度状况以及土壤的持水性能, 易受到诸多外界因素的干扰, 如植被、土壤质地、降水、蒸发及人为活动等^[38-40]。研究区土壤含水量主要由土壤基质, 即砒砂岩和黄土的持水性能决定, 水分分布状况与土壤基质分布一致, 砒砂岩含水量低于黄土含水量, 这与砒砂岩土壤结构有很大关系。该研究区砒砂岩样品均为白色砒砂岩, 特点是粒径较大, 以砂粒为主, 而黏粒含量比较少, 因此砒砂岩土壤中的胶结物质含量较低^[41], 土壤的结构以及稳定性较差, 土壤水分难以保持, 并且黄土—砒砂岩界面隔水层的存在也会对水分下渗起到阻挡作用^[42]。覆土层对于水分有较为明显的提高能力, 改善砒砂岩区的水分状况。土壤在 20—60 cm 深度变异系数较大, 主要是由于黄土—砒砂岩界面多存在此深度, 因此离散程度较大。在植被恢复的过程中, 表层的枯枝落叶层对土壤水分也会起到增加入渗、减少蒸发的作用, 且 4 种人工植被中油松的枝叶以及松针距离根部很近, 遮阴效果比较强, 造成水分的蒸发消耗量更少, 导致油松覆盖下土壤水分含量较高, 这与杨振奇^[43]的研究结果一致。由于植被耗水和水分难以补给的原因, 深层的含水量相对较低, 这一结果与 Yang^[44]的研究结论一致。

3.2 不同植被恢复对土壤养分的影响

根据白杭改、李长明等^[5-6]对砒砂岩矿物成分、土壤特性的研究, 表明砒砂岩的矿物组分易分解、膨胀, 造成岩石发育不成熟, 并且白色砒砂岩尤其不稳定, 颗粒较大, 因此砒砂岩土壤营养元素流失非常严重, 保肥能力极低, 不适宜作物生长^[41]。而磷素在砒砂岩土壤中的形式主要为晶格固定态磷, 植物难以吸收利用^[1]。在区域尺度上, 土壤 pH 多为弱变异, 有机质、全氮、速效磷等养分多为中等变异程度^[45-47], 与本文的研究结果一致。其中, 铵态氮和硝态氮、有机质和全氮的空间变异系数相差不大, 但全磷和速效磷的变异系数相差较大, 主要是由于土壤全磷是土壤中磷元素的总储量, 包括有机磷和无机磷两大类, 可以通过风化、迁移等多种因素累积, 大多以迟效性的状态存在, 而速效磷是存在于土壤中可被植物吸收利用的小部分磷, 研究区不同的植被对速效磷的转化利用能力不同, 造成土壤中累积的速效磷含量差异较大, 进一步导致区域速效磷变异程度较高, 全磷的变化较小, 这一结论与王国梁等的研究结果一致^[48]。因此

区域土壤碳氮磷等养分主要受到生物因素的影响,并且稳定性较差,容易受到随机和人为干扰的影响^[49]。土壤碳、氮、磷含量的高低可以体现土壤肥力的大小,它们的主要来源包括地表枯落物、植物的光合以及地下根系的分解^[17,50-51]。植被—凋落物—土壤—植被的迁移、转化、循环作用对土壤的磷素状况起到至关重要的作用,而枯枝落叶转化成腐殖质主要造成土壤表层的碳、氮累积,这与 Zhang 等^[52]人结论一致。土壤碳氮含量变化趋势相似且空间分布一致,这与陈彦等学者^[53,46]一致,表明土壤氮含量和碳含量呈正相关关系^[54]。但铵态氮的变化除受到凋落物的影响外,

自身挥发影响较大,因此无明显变化规律。沙棘和油松植被恢复使土壤碳氮含量有所提升,与何京丽、梁月等人^[34-35,55]的研究结果一致,认为种植沙棘、油松后提高了土壤的保肥能力。磷素是土壤肥力和质量的主要决定因素和指标,也是植物生长发育所必需的矿质元素^[20,56-58],研究区域植被恢复对土壤磷素的提高并没有明显的作用,是因为磷素主要来源于岩石风化^[27]。本研究结果表明,种植沙棘和油松对于提高砒砂岩区土壤养分含量起到一定的作用,但根据全国第二次土壤普查养分分级标准^[59],研究区内多数深层土壤养分指标依旧处于 6 级水平,整体含量偏低。

表 4 土壤养分的描述性统计

项目	深度/cm	最大值	最小值	平均值	标准差	变异系数/%
OM/(g · kg ⁻¹)	0—10	11.881	4.103	9.044	2.533	28.00
	10—20	11.002	2.089	6.487	2.654	40.92
	20—40	8.857	1.082	4.935	2.450	49.64
	40—60	5.620	1.319	3.686	1.461	39.64
	60—80	5.356	1.095	2.843	1.417	49.83
	80—100	4.286	0.336	2.375	1.159	48.78
TN/(g · kg ⁻¹)	0—10	0.733	0.209	0.465	0.155	33.24
	10—20	0.618	0.052	0.351	0.175	49.85
	20—40	0.500	0.023	0.269	0.172	63.89
	40—60	0.411	0.016	0.186	0.119	64.00
	60—80	0.332	0.025	0.121	0.098	80.84
	80—100	0.209	0.013	0.086	0.067	77.28
NH ₄ ⁺ -N/(mg · kg ⁻¹)	0—10	3.810	2.037	2.860	0.646	22.60
	10—20	3.581	1.586	2.515	0.583	23.20
	20—40	7.420	1.419	2.600	1.597	61.43
	40—60	4.038	1.243	2.051	0.693	33.79
	60—80	2.426	1.091	1.677	0.431	25.73
	80—100	2.309	0.843	1.525	0.400	26.22
NO ₃ ⁻ -N/(mg · kg ⁻¹)	0—10	9.741	1.684	6.040	2.820	46.69
	10—20	5.170	1.294	3.018	1.099	36.42
	20—40	3.500	0.744	2.059	0.761	36.99
	40—60	2.586	0.677	1.288	0.499	38.76
	60—80	2.867	0.647	1.173	0.508	43.34
	80—100	1.551	0.667	1.009	0.289	28.66
TP/(g · kg ⁻¹)	0—10	0.621	0.284	0.463	0.098	21.16
	10—20	0.731	0.256	0.482	0.111	23.07
	20—40	0.777	0.295	0.501	0.134	26.81
	40—60	0.661	0.235	0.473	0.124	26.17
	60—80	0.838	0.183	0.488	0.161	32.88
	80—100	0.905	0.215	0.455	0.178	39.11
AP/(mg · kg ⁻¹)	0—10	2.850	0.000	0.853	0.666	78.09
	10—20	0.947	0.148	0.480	0.251	52.35
	20—40	0.715	0.000	0.327	0.238	72.65
	40—60	0.783	0.000	0.274	0.291	106.26
	60—80	0.810	0.000	0.277	0.254	91.65
	80—100	0.576	0.000	0.202	0.202	99.84

4 结论

本文对内蒙古准格尔旗砒砂岩区进行实地调查并测定分析了区域土壤水分养分,所选研究区处于裸露砒砂岩向覆土砒砂岩过渡区域,结果表明在实施人工植被恢复后,土壤质量得到不同程度的提高。造成土壤水分差异的主要影响因子是研究区土壤基质的不同,黄土较砒砂岩土壤持水能力更好,而植被类型的不同是造成土壤养分差异的主要因素,植被恢复对于土壤碳、氮等养分指标产生积极的作用,以沙棘和油松对土壤养分恢复效果最佳,两种植被恢复类型下研究区土壤有机质含量分别提高了43.12%,34.27%,全氮分别提高了78.95%,42.11%,铵态氮分别提高了25.64%,46.15%,硝态氮分别提高了69.44%和42.22%,其中油松恢复下的土壤水分含量也高于天然草地54.55%。因此,对于砒砂岩区土壤水分的改善,可以考虑覆土层的蓄水保水能力。黄土和砒砂岩界面会对水分的下渗以及下层水分向上损失有一定的改善作用。人工恢复植被可以选择沙棘和油松,进而考虑其种植密度、恢复年限等因素与土壤养分的相关性,且种植的过程中可施用磷肥以改善砒砂岩区土壤磷素水平。

[参 考 文 献]

[1] 伍艳,杨忠芳,刘慧,等.砒砂岩物质组成及其对养分含量的影响[J].人民黄河,2016,38(6):18-21,25.

[2] 史志华,刘前进,张含玉,等.近十年土壤侵蚀与水土保持研究进展与展望[J].土壤学报,2020,57(5):1117-1127.

[3] 陈同德,焦菊英,王颖霖,等.青藏高原土壤侵蚀研究进展[J].土壤学报,2020,57(3):547-564.

[4] 卢立娜,赵雨兴,胡莉芳,等.沙棘(*Hippophae rhamnoides*)种植对鄂尔多斯砒砂岩地区土壤容重、孔隙度与贮水能力的影响[J].中国沙漠,2015,35(5):1171-1176.

[5] 白杭改,明晓冉,刘立,等.暖水乡砒砂岩地球化学分类类型与物源区特征[J].人民黄河,2017,39(9):79-85,89.

[6] 李长明,宋丽莎,王立久.砒砂岩的矿物成分及其抗蚀性[J].中国水土保持科学,2015,13(2):11-16.

[7] Yang Fangshe, Bi Cifen, Cao Mingming, et al. Simulation of sediment retention effects of the double seabuckthorn plant flexible dams in the Pisha Sandstone area of China [J]. Ecological Engineering, 2014,71(07):21-31.

[8] 李传福,刘阳,党晓宏,等.鄂尔多斯砒砂岩区生态恢复研究进展[J].内蒙古林业科技,2019,45(1):49-52.

[9] 郭维敏,李晓丽,王文,等.坡度对紫红色砒砂岩击溅侵蚀的影响[J].中国水土保持科学,2019,17(1):1-9.

[10] 王丽丽,甄庆,王颖,等.晋陕蒙矿区排土场不同改良模式下土壤养分效应研究[J].土壤学报,2018,55(6):

1525-1533.

[11] Wang Ruijie, Yan Feng, Wang Yanjiao. Vegetation growth status and topographic effects in the Pisha sandstone area of China [J]. Remote Sensing, 2020,12(17):1-21.

[12] 杨振奇,郭建英,秦富仓,等.裸露砒砂岩区不同植被类型土壤团聚体稳定性与抗蚀性能[J].水土保持通报,2021,41(3):8-14.

[13] 邢启鑫,饶良懿,王志臻,等.内蒙古砒砂岩不同类型区土壤有机质与速效钾特征[J].水土保持学报,2019,33(6):257-264,272.

[14] 李洪杰,郭月峰,姚云峰,等.砒砂岩区沙棘液流及细根变化对土壤水分变化的响应[J].水土保持通报,2021,41(5):1-7.

[15] 杨振奇,秦富仓,李龙,等.砒砂岩区小流域土壤有机质的空间分布及其环境影响因素研究[J].土壤,2020,52(3):625-632.

[16] 郭曼,郑粉莉,和文祥,等.黄土丘陵区不同退耕年限植被多样性变化及其与土壤养分和酶活性的关系[J].土壤学报,2010,47(5):979-986.

[17] 王彦武,罗玲,张峰,等.河西绿洲荒漠过渡带梭梭林土壤保育效应[J].土壤学报,2019,56(3):749-762.

[18] 张凯,郑华,陈法霖,等.桉树取代马尾松对土壤养分和酶活性的影响[J].土壤学报,2015,52(3):646-653.

[19] 薛立,邝立刚,陈红跃,等.不同林分土壤养分、微生物与酶活性的研究[J].土壤学报,2003,40(2):280-285.

[20] 卢同平,张文翔,牛洁,等.典型自然带土壤氮磷化学计量空间分异特征及其驱动因素研究[J].土壤学报,2017,54(3):682-692.

[21] 罗红,吴建普,边巴多吉,等.西藏人工造林作业区土壤养分特征研究[J].土壤学报,2017,54(2):421-433.

[22] 张勇强,李智超,厚凌宇,等.林分密度对杉木人工林下物种多样性和土壤养分的影响[J].土壤学报,2020,57(1):239-250.

[23] 王昭艳,左长清,曹文洪,等.红壤丘陵区不同植被恢复模式土壤理化性质相关分析[J].土壤学报,2011,48(4):715-724.

[24] 张祎,李鹏,肖列,等.黄土高原丘陵区地形和土地利用对土壤有机碳的影响[J].土壤学报,2019,56(5):1140-1150.

[25] Wang Kaibo, Deng Lei, Zhou Zhengchao, et al. Profile distributions and controls of soil inorganic carbon along a 150-year natural vegetation restoration chronosequence [J]. Soil Science Society of America Journal, 2016,80(1):193-202.

[26] 何群,席欢,万婷.不同植被恢复模式对红原沙化草地土壤理化性质的影响[J].四川环境,2017,36(1):35-40.

[27] 闫丽娟,王海燕,李广,等.黄土丘陵区4种典型植被对土壤养分及酶活性的影响[J].水土保持学报,2019,33

- (5):190-196,204.
- [28] 谭学进,穆兴民,高鹏,等.黄土区植被恢复对土壤物理性质的影响[J].中国环境科学,2019,39(2):713-722.
- [29] 刘文祥,李勇,于寒青.草灌植被恢复提高坡地土壤水稳性团聚体和碳、氮含量的有效性:退耕年限的影响[J].植物营养与肥料学报,2016,22(1):164-170.
- [30] 翁伯琦,郑祥洲,丁洪,等.植被恢复对土壤碳氮循环的影响研究进展[J].应用生态学报,2013,24(12):3610-3616.
- [31] 饶良懿,徐也钦,胡剑汝,等.砒砂岩覆土区小流域土壤可蚀性 K 值研究[J].应用基础与工程科学学报,2020,28(4):763-773.
- [32] 朱雅娟,党宏忠,杜娟,等.覆土砒砂岩区沙棘耗水量及其影响因子[J].水土保持研究,2020,27(4):171-177,183.
- [33] Jian Shengqi, Zhao Chuanyan, Fang Shumin, et al. Evaluation of water use of *Caragana korshinskii* Kom. and *Hippophae rhamnoides* Linns. in the Chinese Loess Plateau [J]. Canadian Journal of Forest Research, 2014,45(1):15-25.
- [34] 何京丽,殷丽强,郭建英,等.砒砂岩地区沙棘生态工程的土壤修复效果分析[J].国际沙棘研究与开发,2013,11(3):19-23.
- [35] 梁月,殷丽强.砒砂岩区沙棘人工林对土壤化学性质的影响分析[J].国际沙棘研究与开发,2014,12(2):15-17.
- [36] 吴晓光,刘龙,张宏飞,等.砒砂岩区主要造林树种枯落物持水性能及土壤物理性质[J].水土保持学报,2020,34(4):137-144.
- [37] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000.
- [38] Zhang Pan, Xiao Peiqing, Yao Wenyi, et al. Profile distribution of soil moisture response to precipitation on the Pisha sandstone hillslopes of China [J]. Scientific Reports, 2020,10(1):1-10.
- [39] Li Jing, Li Zhanbin, Guo Mengjing, et al. Effects of vegetation restoration on soil physical properties of abandoned farmland on the Loess Plateau, China [J]. Environmental Earth Sciences, 2018,77(5):1-9.
- [40] 沈晗悦,信忠保,王志杰.北京山区侧柏林坡面土壤水分时空动态及其影响因素[J].生态学报,2021,41(7):2676-2686.
- [41] 李晓丽,苏雅,齐晓华,等.高原丘陵区砒砂岩土壤特性的试验分析研究[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2011,32(1):315-318.
- [42] 马章怀.覆土砒砂岩区典型退化植被下土壤水分特征及调控[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2020.
- [43] 杨振奇.裸露砒砂岩区人工植被对水力侵蚀的调控机制研究[D].内蒙古 呼和浩特:内蒙古农业大学,2020.
- [44] Yang Lei, Chen Liding, Wei Wei, et al. Comparison of deep soil moisture in two re-vegetation watersheds in semi-arid regions [J]. Journal of Hydrology, 2014,513(1):314-321.
- [45] 苏荣瑞,金卫斌,艾天成,等.基于 GIS 的湖北省江陵县土壤养分空间变异研究[J].长江大学学报(自科版):农学卷,2007,4(3):13-17.
- [46] 刘晓林,李文峰,杨林楠,等.基于 ArcGIS 地统计分析模块的土壤养分空间变异分析:以云南省建水县为例[J].土壤通报,2012,43(6):1432-1437.
- [47] 李龙,姚云峰,秦富仓,等.黄花甸子流域土壤全氮含量空间分布及其影响因素[J].应用生态学报,2015,26(5):1306-1312.
- [48] 王国梁,刘国彬,许明祥.黄土丘陵区纸坊沟流域植被恢复的土壤养分效应[J].水土保持通报,2002,22(1):1-5.
- [49] 袁媛,张鹤,武杼华,等.植被恢复对毛乌素沙地土壤 pH 和养分含量的影响[J].土壤通报,2021,52(1):148-156.
- [50] 何高迅,王越,彭淑娟,等.滇中退化山地不同植被恢复下土壤碳氮磷储量与生态化学计量特征[J].生态学报,2020,40(13):4425-4435.
- [51] 王利彦,周国娜,朱新玉,等.凋落物对土壤有机碳与微生物功能多样性的影响[J].生态学报,2021,41(7):2709-2718.
- [52] Zhang Yongwang, Shangguan Zhouping. The coupling interaction of soil water and organic carbon storage in the long vegetation restoration on the Loess Plateau [J]. Ecological Engineering, 2016,91(3):574-581.
- [53] 陈彦,吕新.基于 GIS 和地统计学的土壤养分空间变异特征研究:以新疆农七师 125 团为例[J].中国农学通报,2005,21(7):389-391,405.
- [54] 李丹维,王紫泉,田海霞,等.太白山不同海拔土壤碳、氮、磷含量及生态化学计量特征[J].土壤学报,2017,54(1):160-170.
- [55] 姜沛沛,曹扬,陈云明,等.不同林龄油松(*Pinus tabulaeformis*)人工林植物、凋落物与土壤 C, N, P 化学计量特征[J].生态学报,2016,36(19):6188-6197.
- [56] Cheng Yuting, Li Peng, Xu Guoce, et al. Effects of soil erosion and land use on spatial distribution of soil total phosphorus in a small watershed on the Loess Plateau, China [J]. Soil & Tillage Research, 2018,184(7):142-152.
- [57] 陈健,刘顺,史作民,等.川西亚高山 3 种森林恢复途径对土壤生物有效磷的影响[J].生态学报,2021,41(7):2698-2708.
- [58] 岑龙沛,严友进,戴全厚,等.喀斯特不同土地利用类型裂隙土壤有机碳及磷素赋存特征[J].生态学报,2020,40(21):7567-7575.
- [59] 程立平,赵玉明,刘沛松.豫西低山丘陵区不同植被修复模式下土壤养分评价[J].江苏农业科学,2015,43(10):423-426.