

不同植被类型土壤氮素对侵蚀环境的响应

居萍¹, 李良俊², 李丽¹

(1. 扬州市职业大学 园林园艺学院, 江苏 扬州 225002; 2. 扬州大学 园艺与植物保护学院, 江苏 扬州 225009)

摘要:以黄土高原神木六道沟流域为研究对象,选取流域内 3 种典型植被类型(林地、草地、灌木)所处的 3 种侵蚀环境(梁峁顶、梁峁坡、沟坡)0—30 cm 土层土壤,对土壤 5 种氮素(全氮、有机氮、矿化氮、铵态氮、硝态氮)对侵蚀环境的响应进行了研究。结果表明:(1)林地土壤全氮和有机氮含量最大,显著高于草地和灌木地,不同植被类型土壤氮素随侵蚀环境的变化规律不尽相同。(2)林地矿化氮和硝态氮含量高于草地和灌木地;灌木地铵态氮高于林地和草地。(3)土壤容重和 pH 与全氮、有机氮、矿化氮、铵态氮和硝态氮呈极显著负相关,有机碳和 C/N 与全氮、有机氮、矿化氮、铵态氮和硝态氮呈极显著正相关。(4)矿化氮占全氮的比例随全氮含量的升高而升高,铵态氮占氮的比例随全氮的升高而降低。通过不同植被类型土壤氮素对侵蚀环境的响应,能够长期为黄土高原农业生产、生态修复与重建提供科学依据。

关键词:黄土高原; 植被类型; 土壤氮素; 侵蚀环境

中图分类号:S157; S714

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2018)06-0001-06

Response of Soil Nitrogen to Erosion Environment in Different Vegetation Types

JU Ping¹, LI Liangjun², LI Li¹

(1. School of Landscape Architecture and Horticulture, Yangzhou Vocational College, Yangzhou, Jiangsu 225002, China; 2. College of Horticulture and Plant Protection, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225009, China)

Abstract: Three typical vegetation types (forest grass, and shrub) in the three types of erosion environments (hilltop, hillside, and ravine slope), and 0—30 cm soil layers of forestland, grassland, and shrub land in Liudaogou watershed on the Loess Plateau of China were selected. The response of five fractions of soil nitrogen (total nitrogen, organic nitrogen, mineralizable nitrogen, ammonium nitrogen, nitrate nitrogen) to the erosion environment was studied. The results showed that: (1) the contents of total nitrogen and organic nitrogen in the forestland soil were the highest, which was significantly higher than those in grassland and shrub land, the contents of soil nitrogen in different vegetation types varied with erosion environments; (2) the contents of mineralizable and nitrate nitrogen in forestland were higher than those in grassland and shrub land; the ammonium nitrogen content in shrub land was higher than those in forestland and grassland; (3) soil bulk density and pH were significantly negatively correlated with total nitrogen, organic nitrogen, mineralizable nitrogen, ammonium nitrogen, and nitrate nitrogen; organic carbon and C/N were associated with total nitrogen, organic nitrogen, mineralizable nitrogen, and ammonium; there was a significant positive correlation between nitrogen and nitrate nitrogen. (4) The ratio of mineralizable nitrogen to total nitrogen increased with the increase of total nitrogen content, and the proportion of ammonium nitrogen in nitrogen decreased with the increase of total nitrogen. The response of soil nitrogen in different vegetation types to the erosion environments can provide scientific basis for long-term agricultural production, ecological restoration and reconstruction on the Loess Plateau.

Keywords: Loess Plateau; vegetation types; soil nitrogen; erosion environment

在陆地生态系统中,土壤侵蚀是影响生物地球化学中氮素循环的重要方面^[1]。土壤侵蚀的加速导致地表大量的沉积物和相关土壤氮素的重新分布。因此,土壤侵蚀不仅造成陆地表面氮元素的重分布和损失,也会导致土壤质量退化、水体富营养化和影响农业生产。根据全球估计,土壤侵蚀造成土壤生态系统中土壤全氮 23~42 Tg(1 Tg=1 012 g)重新分布^[2]。然而,由土壤侵蚀引起的不同植被类型土壤氮素的重新分布仍然存在激烈的争论。

张兴昌等^[3]研究了侵蚀环境下土壤氮素的流失对土壤和环境产生的影响进行了剖析,得出侵蚀环境下氮素的流失对作物生产存在长期和短期效应。Kolberg 等^[4]研究得出,土壤中不同形态的氮素与作物生长密切相关,矿化氮在土壤中的含量决定了植物对土壤中氮素的可利用性,进而影响植物对土壤氮素的利用率。黄土高原区土壤氮素随侵蚀环境的不同差异较大,而植被恢复可以改善侵蚀环境中对氮素的留存^[5-7]。党亚爱等^[8]研究表明土壤有机氮在土壤—植物氮素营养及环境效应中占非常重要的地位。土壤有效氮的主要形态是硝态氮和铵态氮,硝态氮在土壤剖面的积累随植被的恢复呈下降趋势,而铵态氮的积累则不受植被恢复的影响,其被植物吸收利用量约占阳、阴离子吸收利用总量的 70%左右^[9-10]。坡面不同的位置导致侵蚀类型的较大差异,在梁峁顶的位置,侵蚀环境为面蚀;在梁峁坡的位置,侵蚀环境为面蚀和细沟侵蚀;在沟坡的位置,侵蚀环境则为细沟和浅沟侵蚀。在综合考虑整个坡面上,侵蚀环境更能有效地突出侵蚀对氮素的影响。

黄土高原由于土壤侵蚀、植被退化和水土流失严重,使该区成为我国土壤氮素储量最低的地区之一^[11-12]。但关于黄土高原典型侵蚀环境下不同植被类型土壤氮素对土壤和环境的响应研究相对罕见。因此,本文以黄土高原神木县六道沟流域为研究对象,探究侵蚀环境下不同植被类型土壤氮素间的相互关系,皆在为指导黄土高原地区农业生产、植被恢复与重建提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省神木县六道沟流域,是黄土高原典型的水蚀风蚀交错带(38°46'—48°51'N,110°21'—110°23'E)。该流域在地理上既属于黄土高原向毛乌素沙漠过渡、森林草原向典型干旱草原过渡地带,又属于流水作用的黄土丘陵区向干燥剥蚀作用的鄂

尔多斯高原过渡的水蚀风蚀交错带,是典型的水蚀风蚀交错带生态环境脆弱区。其地形特点为典型的盖沙黄土丘陵区,属中温带半干旱气候,冬春季干旱少雨,多风沙,夏秋多雨,且多暴雨及冰雹,流域面积为 6.89 km²,流域海拔为 1 094.0~1 273.9 m,年均降水量 437.4 mm,且 6—9 月的降水量占全年的 80.93%,主要的土壤类型为绵沙土。该流域内主要植被类型以油松(*Pinus tabulaeformis*)为主的林地、苜蓿(*Medicago sativa*)为主的草地、柠条(*Caragana Korshinskii*)为主的灌木地。

1.2 典型样地选取

样品采集于 2017 年 6 月,在流域内分别选择以林地、草地和灌木地为主的 3 个坡面。在每个坡面中,按照不同的侵蚀区间进行样品的采集。在梁峁顶的位置,主要侵蚀类型为面蚀;梁峁坡的位置,主要侵蚀类型为面蚀、细沟侵蚀;沟坡位置,主要侵蚀类型为细沟、浅沟侵蚀。在每个侵蚀区间用土钻按照 9 点“S”形取样,并在每个侵蚀区间设置 3 个重复,重复样品之间的间距均控制在 20 m 以上,每个点取 6~8 粒土壤进行混合,每个采样点的距离均大于 10 m,作为该侵蚀区的代表性样品,采样深度包括 0—10 cm,10—20 cm 和 20—30 cm 共 3 个土层,共采集样品 243 个,带回实验室进行室内分析。

1.3 分析测试方法

土壤有机碳测定采用德国耶拿公司生产的 multi N/C-3100 有机碳分析仪测定^[13],取研磨过 100 目筛的土样 1.000 g,用 1 mol/L 的盐酸溶液浸泡 24 h,以去除土壤中的无机碳,用 TOC 分析仪测定土壤中的有机碳含量;有机氮借鉴 Stewart 等^[14]提出的有机碳物理—化学联合分组方法进行测定。

土壤容重采用环刀法测定;土壤 pH 测定采用电位法进行测定;土壤全氮采用凯氏蒸馏法进行测定;矿化氮采用好气培养法进行测定;铵态氮采用靛酚蓝比色法进行测定;硝态氮采用紫外分光光度法进行测定,以上几种测定方法均参照《土壤分析技术规范》进行测定^[15]。

1.4 数据处理

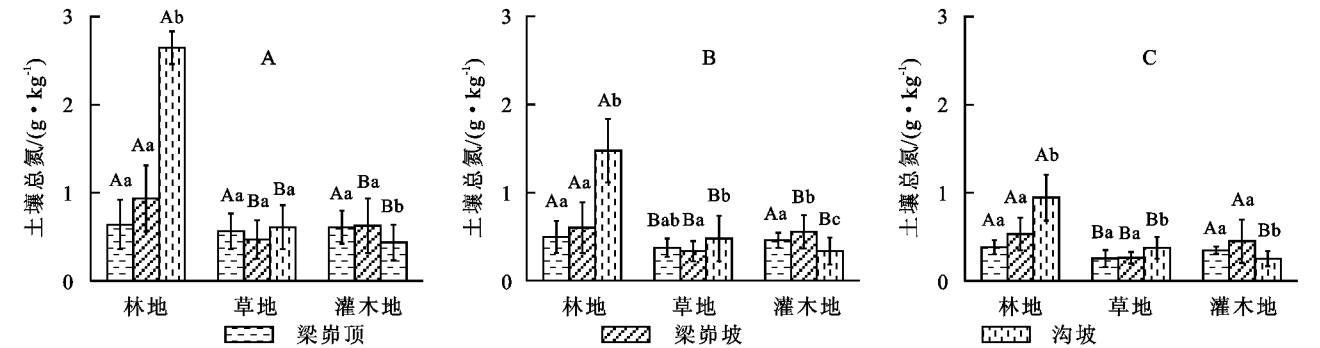
数据处理采用 SPSS 18.0 进行,Origin 8.0 绘制文中图形。

2 结果与分析

2.1 侵蚀环境下不同植被类型土壤全氮含量

由图 1A 可以看出,不同植被类型 0—10 cm 土层在梁峁顶的位置土壤全氮含量差异不显著($p>0.05$),林地梁峁坡(0.92 g/kg)和沟坡(2.64 g/kg)土壤全氮含量

最高($p<0.05$),是草地的 1.98,1.49 倍,灌木地的 4.34,6.04 倍;草地和灌木地在梁峁坡和沟坡的位置土壤全氮含量较为一致,均表现出明显的差异性($p<0.05$);林地在沟坡的位置土壤全氮含量达到最大值($p<0.05$),灌木地则在沟坡位置土壤全氮含量最低($p<0.05$),草地在 3 个位置土壤全氮含量均差异不显著($p>0.05$)。在 10—20 cm 土层土壤(图 1B),在梁峁顶位置,草地全氮含量最低($p<0.05$);林地全氮含量在梁峁坡和坡沟位置,全氮含量均显著高于草地和灌木地($p<0.05$)。林地坡沟位置,土壤全氮含量显著高于梁峁坡和梁峁顶,草地梁峁坡和沟坡之间土壤全氮差异较大,灌木地全氮含量在梁峁坡位置达到最大值,在坡沟位置含量最低。在 20—30 cm 土层土壤(图 1C),



注:大写字母表示同一侵蚀环境不同植被类型之间的差异;小写字母表示同一植被类型不同侵蚀环境之间的差异,下同。

图 1 侵蚀环境下不同植被类型土壤全氮含量

2.2 侵蚀环境下不同植被类型土壤有机氮含量

土壤有机氮和土壤全氮变化趋势几乎完全一致(图 2)。林地沟坡土壤有机氮含量最高($p<0.05$),梁峁顶和梁峁坡差异不大($p>0.05$)。草地 0—10 cm 土层(图 2A),梁峁顶有机氮含量最高,灌木地沟坡有机氮含量最

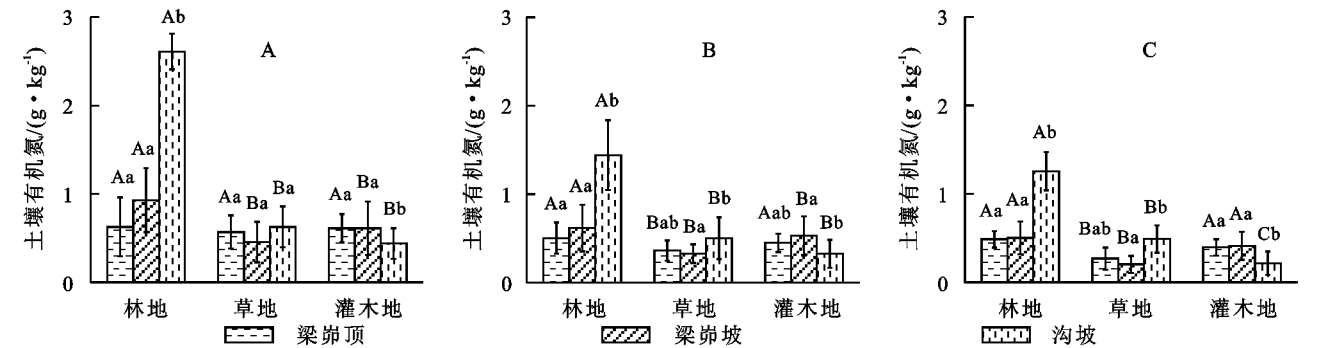


图 2 侵蚀环境下不同植被类型土壤有机氮含量

2.3 侵蚀环境下不同植被类型土壤矿化氮含量

如图 3 所示,林地矿化氮在 11.12~65.34 mg/kg 之间变化,沟坡矿化氮含量最高,梁峁坡居中,梁峁顶最低。0—10 cm 土层矿化氮最大值比最小值高出了 3.05 倍,10—20 cm 土层高出了 3.03 倍,20—30 cm 土层高出了 3.16 倍。草地和灌木地 0—10 cm 土层矿化氮在 3 种侵蚀环境下差异均不显著,矿化氮

低。在 10—20 cm 和 20—30 cm 土层(图 2B、图 2C),3 种植被类型有机氮含量变化趋势一致。3 种植被类型有机氮含量分别介于 0.48~2.61 g/kg,0.20~0.56 g/kg,0.21~0.61 g/kg 之间,林地显著高于草地和灌木地有机氮含量。有机氮占全氮的比例 92%~99%。

最大值分别比最小值高出了 1.25 倍和 1.16 倍,10—20 cm 和 20—30 cm 土层均有所变化。10—20 cm 土层中,草地和灌木地矿化氮最大值比最小值高出了 1.21 倍和 2.68 倍;20—30 cm 土层中,草地和灌木地矿化氮最大值比最小值高出了 1.54 倍和 3.07 倍。整体来看,可以得出土壤矿化氮在不同植被区随侵蚀环境的变化不一致。

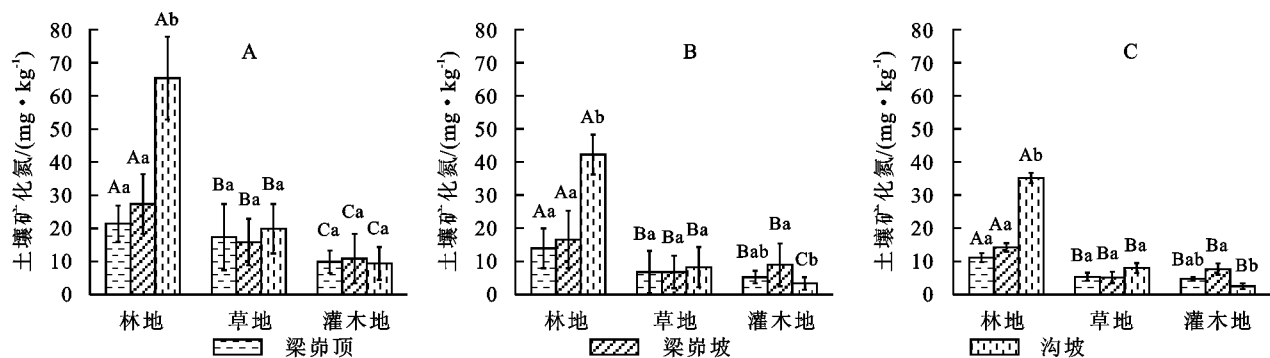


图 3 侵蚀环境下不同植被类型土壤矿化氮含量

2.4 侵蚀环境下不同植被类型土壤硝态氮含量

林地、草地和灌木地硝态氮含量在 0—30 cm 土层变化规律一致(图 4)。林地沟坡硝态氮含量最高,梁岭顶和梁岭坡硝态氮含量差异不显著($p>0.05$)。草地在 0—10 cm 土层中,3 个位置的硝态氮含量差

异不大,在 10—30 cm 土层下,梁岭坡硝态氮含量最低($p<0.05$)。灌木地 0—30 cm 土层深度下,梁岭坡硝态氮含量显著高于沟坡,梁岭顶与梁岭坡和沟坡硝态氮含量差异不显著($p>0.05$)。不同植被类型间进行比较,林地的沟坡硝态氮含量均高于草地和灌木地。

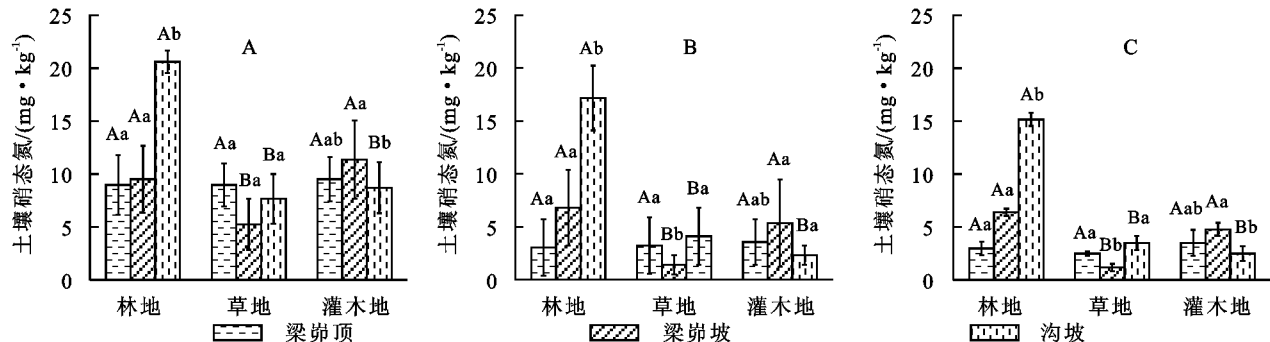


图 4 侵蚀环境下不同植被类型土壤硝态氮含量

2.5 侵蚀环境下不同植被类型土壤铵态氮含量

土壤铵态氮同其他形态氮素相比,含量最低且随着侵蚀的变化较小(图 5)。0—10 cm 土层中,林地梁岭顶铵态氮含量最低,仅为 1.85 mg/kg,显著低于梁岭坡和沟坡铵态氮含量,草地和灌木地随着侵蚀区的变化铵态氮含量较为一致。在 10—20 cm 土层中,林地的梁岭坡铵态氮含量最低,为 1.05 mg/kg 且显著低于梁岭顶和

沟坡,灌木地在梁岭坡铵态氮含量达到最大值,为 2.45 mg/kg 且显著高于梁岭顶和沟坡。在 20—30 cm 土层中,林地梁岭顶铵态氮含量最高,灌木地则以梁岭坡铵态氮含量最高,草地 3 个侵蚀区间铵态氮含量差异不显著($p>0.05$)。3 种植被类型间进行比较,整体的差异不大,林地在 0—10 cm 土层梁岭坡含量最高,灌木地在 10—30 cm 土层梁岭坡铵态氮含量最高。

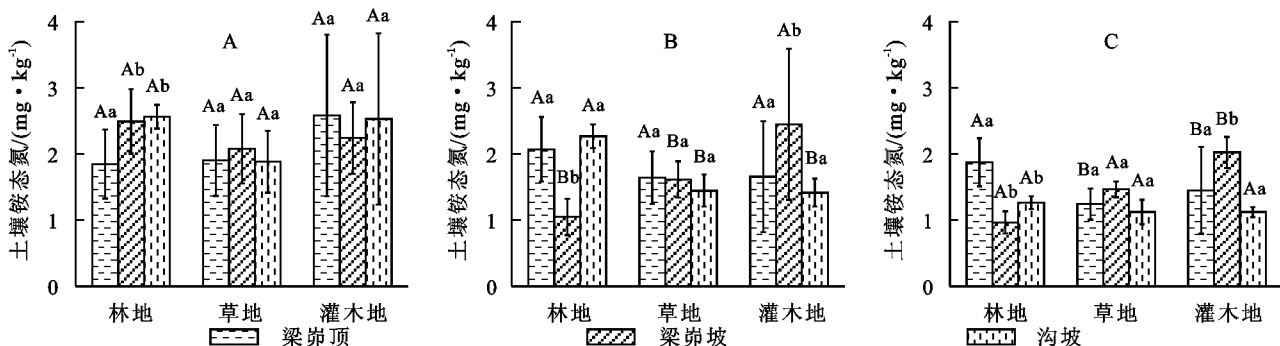


图 5 侵蚀环境下不同植被类型土壤铵态氮含量

2.6 侵蚀环境下土壤氮素的相关性分析

土壤理化性质与各形态氮素以及氮素之间的相关性分析结果如表 1 所示。由表 1 可以看出,土壤容重以及 pH 与全氮、有机氮、矿化氮、铵态氮和硝态氮呈现极显著负相关关系,有机碳和 C/N 与全氮、有机氮、

矿化氮、铵态氮和硝态氮呈现极显著正相关或者显著正相关关系,其中硝态氮和铵态氮与其相关系数较小。土壤全氮、有机氮、矿化氮、铵态氮和硝态氮之间均极显著正相关,其中,全氮、有机氮、矿化氮、硝态氮之间相关性更大,决定系数 R^2 均介于 0.80~1.00 之间。

表 1 土壤氮素及理化性质相关性分析

项目	全氮	有机氮	矿化氮	硝态氮	铵态氮
pH	-0.922**	-0.938**	-0.919**	-0.867**	-0.565**
容重	-0.829**	-0.819**	-0.869**	-0.879**	-0.562**
有机碳	0.998**	0.998**	0.973**	0.899*	0.568**
C/N	0.456*	0.469*	0.474*	0.269	0.029
全氮	1	1.000**	0.969**	0.906**	0.537**
有机氮		1	0.968**	0.892**	0.539**
矿化氮			1	0.896**	0.570**
硝态氮				1	0.638**
铵态氮					1

由于土壤全氮包含矿化氮、硝态氮、铵态氮和微生物量氮,在此基础上研究各形态的氮素与全氮之间的相关关系,各形态氮素存在自相关关系从而导致相关系数增大。因此研究用各种氮素占全氮的百分比之间的相关关系将更准确地反映各项氮素指标与全氮的关系(表 2)。土壤中有有机氮和硝态氮占全氮的比例不随全氮含量的变化而变化,矿化氮占全氮的比例随全氮含量的升高而升高,铵态氮占氮的比例随全氮的升高而降低。

表 2 氮素占全氮比例与全氮相关关系

项目	有机氮/全氮	矿化氮/全氮	铵态氮/全氮	硝态氮/全氮
百分比/%	98.93	0.31	0.29	0.39
全氮	0.094	0.523*	0.287	-0.81**

3 讨论

林地、草地和灌木地土壤氮素对不同侵蚀环境的响应不同。林地土壤全氮以及各形态的氮素变化规律较为一致,沟坡氮素含量均高于梁峁顶和梁峁坡,且随深度的增加,各形态氮素含量均逐渐降低。草地各形态氮素随侵蚀环境的变化含量变化不大。灌木地各形态氮素整体来看,0—10 cm 土层的变化小于 10—30 cm 土层的变化,各形态氮素随侵蚀环境的变化其含量差异较小。黄土高原地区生态环境的逐步恢复,植被演替的过程加快,植被的枯枝落叶以及根系在土壤中逐渐积累、矿化和分解,将自身的大部分营养元素逐渐归还到土壤中,导致土壤中的氮素也随之增加^[16-20]。本研究中林地沟坡土壤氮素均高于梁峁顶和梁峁坡氮素含量,不同侵蚀区的差异导致水热条件等环境因素的不同,进而影响植被覆盖度的差异。不同植被类型不仅可以通过微生物对枯落物和根系的分解来增加氮素对土壤的返还能力,从而增加土壤中氮素的积累,还能通过降低径流形成的时间,截断径流的流线降低土壤侵蚀从而降低氮素流失^[21-23]。

对比 3 种植被类型氮素发现,林地全氮、有机氮、

硝态氮显著高于草地和灌木地,而草地和灌木地差异不显著($p>0.05$)。林地土壤矿化氮含量最高,草地居中,灌木地含量最小。林地、草地和灌木地铵态氮含量差异不显著($p>0.05$)。根据全国第二次土壤普查的结果可以得出,非耕地土壤的全氮含量平均为 1.31 g/kg,对比发现,草地和灌木地全氮含量较为缺乏。3 种植被类型在不同的侵蚀环境中铵态氮含量较为一致,可能是因为铵态氮性质较为稳定,不易受侵蚀环境的影响而发生改变^[24]。不同氮素对不同植被的敏感性不同,其中硝态氮最为敏感,这与邢肖毅等^[25]研究成果相一致。土壤容重和 pH 与氮素呈现极显著负相关关系,有机碳和 C/N 与氮素呈现极显著正相关关系,这与李占斌等^[26]研究结果相一致。

土壤有机碳作为土壤氮素的基质,与各形态氮素呈现极显著正相关关系,其含量的高低会导致土壤氮素的高低^[27]。土壤容重对氮素的转化也存在一定影响,其大小显著影响着土壤微生物的活动,从而影响土壤中氮素的转化^[28]。研究区采集土壤样品均为碱性土壤,土壤 pH 导致微生物活动剧烈,从而影响氮素的积累。土壤中有有机氮和硝态氮占全氮的比例不随全氮含量的变化而变化,矿化氮占全氮的比例随全氮含量的升高而升高,铵态氮占全氮的比例随全氮的升高而降低。矿化氮是全氮中易于转化为矿质氮的有机氮,在氨化作用和硝化作用下,土壤氮素的形态和比例、氮的淋失和反硝化作用等相应变化^[29]。随着土壤全氮含量的增加,土壤中易矿化的氮素增加,从而导致矿化氮含量迅速增加。铵态氮占全氮的比例随全氮的升高而降低,可能是因为硝态氮被大量消耗,一定程度上削弱了由矿化氮的增加而引起的矿质氮的增加。

4 结论

- (1) 不同的植被类型均促进了土壤氮素的累积,而不同植被类型土壤氮素随侵蚀环境的变化规律不尽相同。
- (2) 土壤容重以及 pH 与全氮、有机氮、矿化氮、铵态氮和硝态氮呈现极显著负相关关系,有机碳和 C/N 与全氮、有机氮、矿化氮、铵态氮和硝态氮呈现极显著正相关或者显著正相关关系。
- (3) 土壤中有有机氮和硝态氮占全氮的比例不随全氮含量的变化而变化,矿化氮占全氮的比例随全氮含量的升高而升高,铵态氮占氮的比例随全氮的升高而降低。

参考文献:

- [1] Berhe A A, Torn M S, Harden J W. Soil nitrogen storage and stabilization in eroding landscapes[J]. *Biogeochemistry*, 2017, 132(1): 37-54.
- [2] Quinton J N, Govers G, Van O K, et al. The impact of agricultural soil erosion on biogeochemical cycling[J]. *Nat. Geosci.*, 2010, 3(1): 311-314.
- [3] 张兴昌, 邵明安. 侵蚀条件下土壤氮素流失对土壤和环境的影响[J]. *土壤与环境*, 2000, 9(3): 249-252.
- [4] Kolberg R L, Rouppe B, Westfall D G, et al. Evaluation of an In Situ Net Soil Nitrogen mineralization Method in Dryland Agroecosystems[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1997, 61(2): 504-508.
- [5] 张俊清, 朱平, 张夫道. 有机肥和化肥配施对黑土有机氮形态组成及分布的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2004, 10(3): 245-249.
- [6] 谢秋发, 刘经荣, 石庆华, 等. 不同施肥方式对水稻产量、吸氮特性和土壤氮转化的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2004, 10(5): 462-467.
- [7] 查春梅, 颜丽, 郝长红, 等. 不同土地利用方式对棕壤有机氮组分及其剖面分布的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(1): 22-26.
- [8] 党亚爱, 王国栋, 李世清. 黄土高原典型土壤有机氮组分剖面分布的变化特征[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(24): 5021-5030.
- [9] 孟盈, 薛敬意, 沙丽清, 等. 西双版纳不同热带森林下土壤铵态氮和硝态氮动态研究[J]. *植物生态学报*, 2001, 25(1): 99-104.
- [10] 苗艳芳, 李生秀, 徐晓峰, 等. 冬小麦对铵态氮和硝态氮的响应[J]. *土壤学报*, 2014, 51(3): 564-574.
- [11] Siemens J, Pacholski A, Heiduk K, et al. Elevated air carbon dioxide concentrations increase dissolved carbon leaching from a cropland soil[J]. *Biogeochemistry*, 2012, 108(1/3): 135-148.
- [12] 邹亚丽, 牛得草, 杨益, 等. 氮素添加对黄土高原典型草原土壤氮矿化的影响[J]. *草地学报*, 2014, 22(3): 461-468.
- [13] 张祎, 任宗萍, 李鹏, 等. 黄土丘陵区小流域生态恢复对土壤有机碳和全氮的影响[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(1): 97-103.
- [14] Stewart C E, Paustian K, Conant R T, et al. Soil carbon saturation: concept, evidence and evaluation[J]. *Biogeochemistry*, 2007, 86(1): 19-31.
- [15] 全国农业技术推广服务中心. 土壤分析技术规范[M]. 2版. 北京: 中国农业出版社, 2006.
- [16] 马玉红, 郭胜利, 杨雨林, 等. 植被类型对黄土丘陵区流域土壤有机碳氮的影响[J]. *自然资源学报*, 2007, 22(1): 97-105.
- [17] 张笑培, 杨改河, 王和洲, 等. 黄土沟壑区植被恢复中土壤生物学特性的响应及其评价[J]. *中国农学通报*, 2010, 26(15): 323-327.
- [18] 张兴昌, 邵明安. 黄土丘陵区小流域土壤氮素流失规律[J]. *地理学报*, 2000, 55(5): 617-626.
- [19] Bedard-Haughn A, Matson A L, Dan J P. Land use effects on gross nitrogen mineralization, nitrification, and N₂O emissions in ephemeral wetlands[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2007, 38(12): 3398-3406.
- [20] Maithani K, Arunachalam A, Tripathi R S, et al. Nitrogen mineralization as influenced by climate, soil and vegetation in a subtropical humid forest in northeast India [J]. *Forest Ecology & Management*, 1998, 109(1): 91-101.
- [21] 张祎, 李鹏, 刘晓君, 等. 黄土丘陵区不同植被类型枯落物持水效能研究[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(5): 100-105.
- [22] 刘向东, 吴钦孝, 赵鸿雁. 森林植被垂直截留作用与水土保持[J]. *水土保持研究*, 1994, 1(3): 8-13.
- [23] 许炯心. 水土保持措施对无定河流域沟道—河道系统泥沙收支平衡的影响[J]. *中国水土保持科学*, 2009, 7(4): 7-13.
- [24] 苗艳芳, 李生秀, 扶艳艳, 等. 旱地土壤铵态氮和硝态氮累积特征及其与小麦产量的关系[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(4): 1013-1021.
- [25] 邢肖毅, 黄懿梅, 安韶山, 等. 黄土高原沟壑区森林带不同植物群落土壤氮素含量及其转化[J]. *生态学报*, 2013, 33(22): 7181-7189.
- [26] 李占斌, 周波, 马田田, 等. 黄土丘陵区生态治理对土壤碳氮磷及其化学计量特征的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(6): 312-318.
- [27] 王常慧, 邢雪荣, 韩兴国. 草地生态系统中土壤氮素矿化影响因素的研究进展[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(11): 2184-2188.
- [28] 彭佩钦, 张文菊, 童成立, 等. 洞庭湖湿地土壤碳、氮、磷及其与土壤物理性状的关系[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(10): 1872-1878.
- [29] Montagnini F, Buschbacher R. Nitrification rates in two undisturbed tropical rain forests and three slash-and-burn sites of the Venezuelan Amazon[J]. *Biotropica*, 1989, 21(1): 9-14.