DOI: 10.5846/stxb201906191292

郭二辉,方晓,马丽,杨小燕,杨喜田.河岸带农田不同恢复年限对土壤碳氮磷生态化学计量特征的影响——以温榆河为例.生态学报,2020,40 (11):3785-3794.

Guo E H, Fang X, Ma L, Yang X Y, Yang X T.Effects of different recovery years on the ecological stoichiometry characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus in riparian farmland: a case study of Wenyu River. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(11):3785-3794.

河岸带农田不同恢复年限对土壤碳氮磷生态化学计量 特征的影响

——以温榆河为例

郭二辉,方 晓,马 丽,杨小燕*,杨喜田

河南农业大学林学院,郑州 450002

摘要:弃耕地撂荒是土壤与植被向自然方向进行的次生演替,研究河岸带土壤撂荒后碳氮磷生态化学计量特征,是恢复和重建 由农田干扰导致的退化河岸带生态系统的重要科学基础之一。以河岸带农地为对照,不同撂荒年限(撂荒2年、撂荒8年、撂荒 10年)的土壤为研究对象,探索不同撂荒年限对土壤碳、氮、磷含量及相互关系的影响。结果表明:(1)土壤有机碳、氮的含量均 呈现撂荒10年>撂荒8年>农田>撂荒2年;土壤中磷含量呈现撂荒10年>撂荒8年>撂荒2年>农田;农田和各撂荒年限的土 壤碳、氮、磷含量,均随着土层深度的增加而呈降低的规律,但土壤碳和氮差异的显著性比磷明显。(2)河岸带土壤中 C/N、C/P 的均值均呈现:撂荒10年>农田>撂荒8年>撂荒2年趋势。N/P的均值呈现:撂荒10年(0.78)>农田(0.77)>撂荒8年(0.77)> 撂荒2年(0.67),表明N是本研究区河岸带植被恢复的限制性营养元素。(3)河岸带农田和不同撂荒年限土壤碳、氮含量均存 在极显著的耦合线性关系,而碳与磷、氮与磷之间的线性拟合程度相对较低。(4)在农田撂荒演替的初期阶段(2年),土壤的 容重没有显著的变化,而随着撂荒时间的增加(8年和10年),土壤容重均有显著的降低,土壤结构得到改善。 关键词:河岸带;农田撂荒;碳氮磷生态化学计量;生态恢复

Effects of different recovery years on the ecological stoichiometry characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus in riparian farmland: a case study of Wenyu River

GUO Erhui, FANG Xiao, MA Li, YANG Xiaoyan^{*}, YANG Xitian College of Forestry, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China

Abstract: Abandoned farmland is the secondary succession of soil and vegetation toward the natural direction. Studying the eco-stoichiometric characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus in riparian soil of the abandoned farmland is one of the important scientific bases for restoring and rebuilding the degraded riparian ecosystem caused by farmland disturbance. Taking the riparian farmland as the control, this paper studies the impacts of different abandonment years (2 years, 8 years, and 10 years) on soil carbon, nitrogen, phosphorus contents and their interrelationships in the riparian zone. The results showed that (1) the soil organic carbon and nitrogen content presented abandonment of 10 years > abandonment of 8 years > abandonment of 2 years. The soil phosphorus content was in order of abandonment of 10 years > abandonment of 2 years > farmland. The soil carbon, nitrogen and phosphorus content of

收稿日期:2019-06-19; 网络出版日期:2020-03-31

基金项目:河南省青年人才托举工程项目(2019HYTP013);国家自然科学基金青年项目(41401206)

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: yangxy0566@163.com

farmland and abandonment years decreased with the increase of soil depth. However, the difference of soil carbon and nitrogen was more significant than that of phosphorus. (2) The average values of C/N and C/P in riparian soils showed a trend of abandoning for 10 years, farmland, 8 years and 2 years. The mean values of N/P were as follows: abandonment for 10 years (0.78) > farmland (0.77) > abandonment for 8 years (0.77) > abandonment for 2 years (0.67), which indicated that N was the limited nutrient element for vegetation restoration in riparian zone of the study area. (3) There was a significant coupling linear relationship between C and N contents in riparian farmland and soils with different abandonment years, but the linear fitting degree between C and P, N and P was relatively low. (4) At the initial stage of abandonment succession (2 years), the soil bulk density did not change significantly, but with the increase of abandonment time (8 years and 10 years), the soil bulk density decreased significantly and soil structure improved.

Key Words: riparian ecosystem; abandoned farmland; eco-stoichiometric characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus; ecological restoration

碳(C)、氮(N)、磷(P)等养分元素在促进生态系统的物质循环、能量流动和群落演替,对维持整个生态系统稳定性和可持续性方面具有极其重要的作用^[1-3]。土壤生态化学计量特征对于养分的可获取性以及 C、N、P 等元素的生态地球化学循环平衡方面具有重要意义和指示作用^[4]。土壤的 C、N、P 比值对于揭示生态系统结构、过程和功能的影响因素及作用机制至关重要,已经成为当前修复生态学研究的热点和焦点之一^[5]。C、N、P 作为土壤养分循环与转化的关键元素,调控和驱动着整个生态系统的演替过程,在植物生长进程中发挥非常重要的作用。因此,研究土壤 C、N、P 生态化学计量特征对于揭示土壤养分的有效性、限制性、可获得性和养分循环等具有重要指示作用,也是反映土壤质量的灵敏指标^[5-7]。土壤的 C、N、P 比值受土地利用、地形地貌和管理措施等因素的影响,目前对于农田退耕的生态化学计量研究主要集中在低山丘陵区、黄土丘陵区等,而对于河岸带区域研究则相对较少^[4,89]。河岸带是水陆生态过渡带与交错区,也是河流的重要组成部分与保护河流的自然生态屏障。河岸带所占的景观面积较小,但却提供了极其重要的供应、调节、文化和支持等生态系统服务功能^[2,10-12]。河岸带生态系统也是一个脆弱的、易受水文、人类活动等干扰而退化的生态区域,具有明显的边缘效应和独特的生态过程,也被公认为全球生物地球化学循环和生态恢复的热点区域^[1,13-15]。由于人口数量的增加和对粮食的需要,许多河岸区域都被开垦种植为农田,造成了河岸生物栖息地的丧失、水土流失的加剧、河岸生境的均一化,以及河流水体的污染等生态环境问题^[16-18]。

近年来,随着人们对生态环境保护的日益重视以及对河岸带生态服务功能和生态价值认知能力的提升, 河岸区域的许多农田逐渐被弃耕撂荒。退耕后的土壤是植被恢复和群落演替赖以生存和发展的基础,也是维 持河岸带生态健康与可持续的重要资源。河岸带生态系统具有不可替代的生态服务功能,深入了解河岸带区 域的土壤 C、N、P 生物地球化学循环过程,对认识河岸带生态系统空间格局变化规律和 C、N、P 元素的循环与 平衡机制,揭示养分的可获得性、预测群落的演替趋势和生态修复都具有重要意义,同时对于提升河岸带生态 系统在气候变化背景下的适应能力也越来越重要。本研究以农田为对照、分别选取了撂荒 2 年、撂荒 8 年和 撂荒 10 年的样地作为研究对象,对比分析了不同撂荒年限河岸带土壤 C、N、P 分布规律及生态化学计量学特 征,以及河岸带土壤 C、N、P 含量之间的相互关系,以期阐明河岸带土壤生态化学计量学特征对不同撂荒年限 的响应,为受损河岸带生态系统的植被恢复和群落重建提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区样品采集

温榆河属于海河流域的北运河水系,位于北京市北部,流经昌平、海淀、顺义、朝阳和通州,全长约 47.5 km,流域面积2478 km²。本试验分别在温榆河河岸带,以农田为对照(control check,CK),同时选择了撂 荒2年、撂荒8年和撂荒10年的样地作为研究对象,样带以垂直于河道设置,每条样带河道到河漫滩长约 60—100 m 左右,采样间距为 10 m,每个样地设置 3 个重复样带用于植被调查与土壤采样。在每个样方内用 土钻按照 0—5 cm、5—10 cm、10—20 cm、20—30 cm 进行分层采样。试验样地基本情况见表 1 所示。

Table 1 General feature of the sampling sites in this study			
植被类型 Vegetation type	样地数 Number of plots	海拔 Altitude/m	样地情况描述 Descriptions of experimental plots
农田 Corn field	7	24	种植的玉米地,盖度为98%左右
退耕 2 年的撂荒草地 Abandoned farmland	10	23	撂荒 2 年的玉米地,盖度为 70%,优势种为苋菜(Amaranthus mangostanus L.)、灰 绿藜 (Chenopodium glaucum)、狗 尾 草 (Setairaviridis (L.) Beauv)、马 唐 (D. sanguinalis)等
退耕 8 年的撂荒草地 Abandoned farmland	8	30	退耕 8 年左右的撂荒草地,盖度 96%,优势种有猪毛菜(Salsola collina)、猪毛蒿 (A. scoparia)、马唐(D. sanguinalis)、牛筋草(E. indica)、蒺藜(Tribulus terrestris)、 葎草(Humulus japonicus)、绿穗苋(A. hybridus)等
退耕 10 年的撂荒草地 Abandoned farmland	10	30	退耕 10 年左右的撂荒草地,盖度 96%,优势种有绿穗苋(Amaranthus hybridus L.)、灰绿藜(Chenopodium glaucum)、狗尾草(Setairaviridis(L.) Beauv)、牛筋草(E. indica)、猪毛菜(Salsola collina)、猪毛蒿(A. scoparia)、苜蓿(Medicago sativaLinn)等

表 1 试验样地基本情况

1.2 测定方法

土样带回实验室风干,以四分法取样并过2 mm 筛,移出砾石和根系,之后再过0.15 mm 筛。土壤容重采 用环刀法,土壤全氮(Total Nitrogen,TN)用元素分析仪测定(Vario EL III Element Analyzer),土壤全磷采用钼 锑抗比色法测定,土壤有机碳采用重铬酸钾氧化-外加热法测定。

1.3 数据处理

采用 Excel 2013 和 SPSS 19.0 软件进行数据处理和分析。

2 结果与分析

2.1 河岸带不同撂荒年限对土壤容重的影响

土壤容重也是反映土壤质量和植被生产力水平的重要指标。图 1 表明,农田撂荒可以降低土壤的容重, 改善土壤的物理结构。在 0—10 m 土壤,农田撂荒 2 年,土壤的容重没有显著的变化;而撂荒 8 年和 10 年后, 土壤容重均有显著的降低,分别减少了 8.97%和 10.90%。在 10—20 cm 和 20—30 cm 的土壤,农田撂荒 2 和 8

年,土壤的容重均有所降低,但没有显著的差异;而撂荒 10年,土壤的容重都有显著性的降低。在 10—20 cm 的土壤,农田撂荒 10 年后,容重降低了 8.18%。在 20— 30 cm 的土壤,农田撂荒 10 年后,容重降低了 8.70%。

2.2 不同撂荒年限对河岸带土壤碳、氮、磷分布特征的 影响

河岸带农田的撂荒年限显著影响着土壤碳含量的 变化。图 2 表明在 0—5 cm、5—10 cm、10—20 cm 和 20—30 cm 各类型土壤碳含量之间均存在差异。各层 土壤碳含量均呈现撂荒 10 年最高,撂荒 10 年后各土壤 层次碳含量平均比撂荒 8 年高 26.26%,比撂荒 2 年高 99.61%,比农田高 35.27%。农田、撂荒 2 年、撂荒 8 年 和撂荒 10 年土壤碳含量随着土壤深度增加而显著 降低。

结果表明,随着退耕年限的增加,河岸土壤的全氮







CK:对照 Control check;不同小写字母表示同一土层,不同撂荒年 限间具有显著性差异(P<0.05)



图 2 河岸带不同撂荒年限的土壤碳、氮、磷含量分布特征

Fig.2 The distribution of soil carbon, nitrogen and phosphorus contents in different abandoned year of farmland in the riparian buffer 不同小写字母表示同一土层,不同撂荒年限间具有显著性差异(*P*<0.05)

含量整体呈现增高的趋势,但主要表现在 0—5 cm 和 5—10 cm 土层。在 0—5 cm 的表层土壤,撂荒 2 年后, 土壤的全氮有所提高,但没有显著的差异;农田撂荒 8 和 10 年,土壤的全氮含量都有显著性的增加,分别增加 了 67.09%和 55.70%。在 5—10 cm 的土层,撂荒 2 年和 8 年的土壤全氮含量均没有显著的变化;撂荒 10 年的 土壤全氮提高了 28.21%,具有显著的差异。撂荒 10 年后,各土壤层氮含量平均比撂荒 8 年高 11.56%,比撂 荒 2 年高 33.21%,比农田高 24.39%。结果也表明,农田、撂荒 2 年、撂荒 8 年和撂荒 10 年土壤氮含量随着土 壤深度增加而显著降低。

农田撂荒的初期阶段如 2 和 8 年, 土壤的 0—5 cm 和 5—10 cm 的土壤全磷含量有较为明显的增加, 而 10—20 cm 和 20—30 cm 土层, 增加不明显。农田撂荒 10 年后, 土壤的全磷含量在 4 个土层均有较为显著的 增加, 土壤磷含量最高。如 0—5 cm 土壤, 农田撂荒 2 、8 、10 年, 土壤的全磷含量分别增加了 18.95%、15.79% 和 25.26%。在 5—10 cm 土壤, 农田撂荒 2 年, 土壤的全磷含量分别增加了 6.52%, 没有显著性的差异; 撂荒 8 和 10 年后, 土壤的全磷含量均有显著性的增加, 分布增加了 13.04%和 27.17%。在 10—20 cm 土层, 撂荒 10 年后, 土壤的全磷含量增加了 17.71%。在 20—30 cm 土层, 撂荒 10 年后, 土壤的全磷含量增加了 16.09%。农 田土壤磷含量随土壤深度加深而逐渐降低, 但差异不显著, 但撂荒 2 年、撂荒 8 年和撂荒 10 年土壤磷含量随 着土壤深度增加而降低较为明显。

2.3 不同恢复年限对土壤 C:N:P 的影响

河岸带的撂荒年限显著影响土壤 C/N,C/P 和 N/P。图 3 表明,在 0—5 cm 和 5—10 cm,不同撂荒恢复年限的土壤 C/N 之间有显著差异。在 10—20 cm 和 20—30 cm 各类型土壤 C/N 之间差异不明显。其中撂荒 8 年的土壤 C/N 各土壤层次间差异较大且存在显著差异。农田在不同土层之间的 C/N 基本保持恒定且各层之间差异较小,平均值为 10.01;而撂荒 2 年和撂荒 10 年的 C/N 随着土壤深度的增加而减小,但差异程度不明显,变化范围分别为 5.27—8.72 和 9.82—12.12。

农田 C/P 的平均值为 7.77, 撂荒 2 年、8 年和 10 年后, 各土壤层次之间 C/P 差异显著, 随着土壤深度的增加 C/P 逐渐降低。在 0—5 cm、5—10 cm、10—20 cm 和 20—30 cm 土层, 土壤的 C/P 均有明显的差异。土壤 N/P 比自农田弃耕后先降低, 后随撂荒年限的增加逐渐增加, 撂荒 2 年<撂荒 8 年<撂荒 10 年。0—5 cm、10—20 cm 和 20—30 cm 土壤层次, 各种类型土壤 N/P 均存在较为显著差异。农田、撂荒 2 年、撂荒 8 年和撂荒 10 年的土壤 N/P 随着土壤深度的增加而降低。

图 3 河岸带不同撂荒年限土壤对 C/N、C/P、N/P 的影响

2.4 不同恢复年限对土壤的 C、N、P 的相关关系 由图 4 可知,农田、撂荒 2 年、撂荒 8 年和撂荒 10 年土壤中碳、氮含量均呈现显著的线性回归关系。碳、 磷的含量在农田、撂荒2年、撂荒8年和撂荒10年中呈现的不显著的线性回归关系,农田撂荒后,随着撂荒年 限的增加,线性趋势越明显。农田、撂荒2年、撂荒8年和撂荒10年在土壤的氮、磷含量之间存在不显著的线 性回归关系,随着撂荒年限的增加,线性趋势越明显。

3 讨论

3.1 河岸带不同撂荒年限对土壤 C、N、P 含量的影响

河岸带水文环境和地形地貌复杂多变,是土壤碳、氮、磷生物地球化学循环非常活跃的区域,也是土壤氮 磷迁移循环过程中的重要源和汇景观^[18]。河岸带农田撂荒后,群落就开始了次生演替过程,植被的恢复及其

http://www.ecologica.cn

Fig.4 Relationship between soil carbon, nitrogen and phosphorus in different abandoned year of riparian farmland

与土壤的相互作用使土壤质量得到逐步改良^[19]。在撂荒演替的过程中土壤有机碳反映比较灵敏,影响着植物群落的潜在生产力,同时在调节土壤养分流向和土壤性质方面有重要作用。研究结果也发现随着撂荒年限的增加土壤中有机碳和全氮的平均含量呈现增加趋势:撂荒 10 年>撂荒 8 年>农田>撂荒 2 年。在撂荒演替的初期阶段,植被的种类和盖度也较小,土壤的同化作用较强,土壤中的有机质和氮含量被大量的消耗或流失,造成撂荒初期的碳氮含量小于农田的碳氮含量^[20-21]。但到撂荒 8 年和 10 年,土壤中的碳氮含量均高于农田水平,其原因可能是随着恢复年限的延长,植被的种类和数量提高,植物枯落物和根系也逐渐增加。河岸带农田及不同撂荒年限的土壤有机碳和全氮随着土壤深度的增加含量逐渐减小,呈现出表层富集现象,这可能与土壤表层枯落物、根系和土壤微生物活性较高有关,促进了土壤碳、氮的积累。赵娜等^[22]在华北低丘山地的研究也表明,随着退耕年限的增加,退耕刺槐人工林土壤养分的表层富集作用显著,且 0—5 cm 土层土壤改良效果增强。李永强等^[16]在内蒙古草原的研究发现,随撂荒年限的增加,土壤全氮、全磷、碱解氮等均呈现出先降低后增加的趋势,土壤养分相对于植被变化具有迟滞性,本研究也证明了温榆河河岸带农田撂荒后土壤碳氮含量具有迟滞效应。当由次生裸地到植物迅速生长发育时养分是从土壤到植物体内的转移,土壤养分库为流失状态,后期随植物种类和数量的增多,随着根系和枯枝落叶回归土壤,而直接参与土壤物质循环量增加,植物残体能够补充土壤养分的损失,土壤养分含量得到提高。张超等^[23]在黄土丘陵区的研究表明,撂荒后阴坡的有机碳、全氮含量在演替前期变化较小,而后期随撂荒年限的延长而显著增加。

河岸带土壤中磷含量对于撂荒年限的响应和碳和氮并不相同,撂荒 10 年>撂荒 8 年>撂荒 2 年>农田,自 撂荒开始,土壤中磷的含量就在逐渐恢复。土壤中的 P 元素除了受成土母质的影响,主要来自于地上生物量 的归还,随着退化河岸恢复时间的延长,其物种丰富度和群落结构复杂度也逐渐提高,有利于 P 元素的累积。 在农田撂荒的初期阶段如 2 和 8 年,土壤的 0—5 cm 和 5—10 cm 的土壤全磷含量有较为明显的增加,而 10— 20 cm 和 20—30 cm 土层,增加不显著。农田撂荒 10 年后,土壤的全磷在 4 个土层均有较为显著的增加。在 陕北黄土丘陵区农田撂荒次生演替过程中,土壤的有机质、全氮、全磷都呈现先减少后增加的趋势,但本研究 的结果表明,在河岸带农田撂荒恢复过程中,土壤的有机质、全氮有先减少后增加的趋势,而土壤磷一直呈现 增加的趋势,这可能与土壤磷素循环与碳、氮养分元素的循环不同有关^[1]。磷是一种沉积性物质,在土壤中 的迁移率相对比较低,同时随着河岸农田恢复年限的增加,大量枯枝落叶的降解对土壤全磷具有重要的影响, 造成土壤磷含量的逐步提升。

3.2 河岸带不同撂荒年限对土壤容重的影响

本研究表明,河岸农田撂荒能有效地改善土壤的结构,降低土壤的容重。随着撂荒年限的增加,地表分布 有大量的草本植物根系,土壤具有良好的通透性,土壤的结构变得疏松。土壤容重可以反应土壤孔隙率状况, 影响土壤养分的有效化和植物的生长^[5]。在0—10 cm 土壤,农田撂荒 2 年,土壤的容重没有显著的变化;而 撂荒 8 年和 10 年后,土壤容重均有显著的降低,分别减少了 8.97%和 10.90%。在 10—20 cm 和 20—30 cm 的 土壤,农田撂荒 2 和 8 年,土壤的容重均有所降低,但没有显著的差异;而撂荒 10 年,土壤的容重都有显著性 的降低。在 10—20 cm 的土壤,农田撂荒 10 年后,容重降低了 8.18%。在 20—30 cm 的土壤,农田撂荒 10 年 后,容重降低了 8.70%。这也表明,河岸农田撂荒恢复后能改善土壤容重和孔隙度状况,从而形成团粒结构等 良好土壤结构。

3.3 河岸带不同撂荒年限的土壤 C、N、P 含量比值

土壤的 C、N、P 比受区域气候、植被、地貌、母岩、土壤动物等成土因子及人类活动等综合因素的影响,其 空间异质性较强,是反映土壤内部碳氮磷循环及养分的限制性的重要指标^[6]。C/N 是土壤氮素矿化能力的 标志,与土壤有机质分解速率成反比关系,C/N 值越大,释放出有效 N 量就越少^[3]。河岸带撂荒土壤中 C/N 的均值呈现:撂荒 10 年(10.69)>农田(10.01)>撂荒 8 年(9.59)>撂荒 2 年(7.02)。撂荒 2 年的土壤 C/N 均 值较低,这可能与撂荒初期土壤中有机质生物矿化分解有关,河岸农田撂荒初期植被郁闭度小,植被的固碳能 力还较弱,因而导致 C/N 的均值最低。土壤 C/P 可以表征土壤有机质矿化释放 P 或吸收固定 P 的潜力。C/ P 的均值呈现:撂荒 10 年(8.53)>农田(7.77)>撂荒 8 年(7.45)>撂荒 2 年(4.82)。土壤磷的来源主要是含磷 矿石的风化及以植被凋落物的降解,其中土壤母质是影响其含量的主要因素。研究区土壤 C/P 随恢复年限 的延长呈现先降低而后增加的趋势。

N和P是河岸带植物生长必须的矿物质营养元素和限制性养分,其含量的高低影响植物的生长与群落的 演替过程,对湿地生态系统的生产力和生态净化功能等有重要影响,因而 N/P 是限制性养分判断的重要指标 之一。N/P 的均值呈现:撂荒10年(0.78)>农田(0.77)>撂荒8年(0.77)>撂荒2年(0.67)。研究的结果与敦 煌阳关湿地 N/P 均值为 0.83^[24]、黄河三角洲新生湿地 N/P 均值为 0.77^[25]等地的结果较为一致,远低于全国 N/P 的平均值8,因此 N 元素也是本研究区植物生长繁育的限制性营养元素。河岸带农田弃耕后,由于河岸 带地理位置的特殊性,土壤水土流失严重,造成土壤中碳和氮的流失,在经过长期的自然恢复下,河岸带土壤 才逐渐具有固碳和固氮的能力。氮和磷通常是生态系统中的主要限制性元素^[26-27]。河岸带撂荒土壤 C/N、 C/P 在垂直结构上均随着土壤深度的增加,而显著降低,这主要是因为土壤碳和氮主要来源于植物凋落物的 降解,表层土壤碳和氮含量均明显高于深层土壤。

3.4 不同撂荒年限对土壤 C、N、P 比值的相关关系

本研究结果表明,河岸带农田、撂荒2年、撂荒8年和撂荒10年的土壤中碳、氮含量存在极显著的耦合线 性关系,与Tian等^[28]在全国尺度的研究结论一致。进一步表明撂荒并没有显著改变土壤碳氮之间的关系, 只是影响了碳氮线性的斜率和截距,这与有关研究结论相符^[29-31]。由于磷元素的迁移循环机制与碳氮的不 一致,碳、氮是气体型循环,其受植物的吸收固定和枯落物养分归还和分解的影响;而磷元素是沉积性循环,其 主要受土壤母质风化的影响,其含量大小更大程度上取决于立地的地质特征,这也造成了碳磷、氮磷的相互关 系在撂荒过程中也出现了较大的不确定性。

4 结论

(1)随着河岸农田撂荒年限的增加,土壤碳和氮的含量均呈现撂荒 10 年>撂荒 8 年>农田>撂荒 2 年,土 壤中磷含量呈现撂荒 10 年>撂荒 8 年>撂荒 2 年>农田。农田和各撂荒年限的土壤碳、氮、磷含量,均存在表 层富集规律,但土壤碳和氮的表层富集效应比磷明显。 (2)河岸带土壤中 C/N 和 C/P 均呈现:撂荒 10 年>农田>撂荒 8 年>撂荒 2 年趋势。河岸带土壤中 C 和 N 的空间变异最大,P 空间变异较小。农田、撂荒 2 年、撂荒 8 年和撂荒 10 年的土壤 C/N、C/P 和 N/P 随着土 壤深度的增加而呈现降低趋势。N/P 的均值表明 N 是本研究区的限制性营养元素,次生演替和植被恢复过 程易受到土壤 N 含量的限制。

(3)河岸带农田、撂荒2年、撂荒8年和撂荒10年的土壤中碳、氮含量存在极显著的耦合线性关系,而碳 与磷、氮与磷之间的线性拟合程度相对较低。在农田撂荒演替的初期阶段(2年),土壤的容重没有显著的变 化,而随着撂荒时间的增加(8年和10年),土壤容重均有显著的降低。

参考文献(References):

- [1] Bertolet B L, Corman J R, Casson N J, Sebestyen S D, Kolka R K, Stanley E H. Influence of soil temperature and moisture on the dissolved carbon, nitrogen, and phosphorus in organic matter entering lake ecosystems. Biogeochemistry, 2018, 139(3): 293-305.
- [2] Capon S J, Pettit N E. Turquoise is the new green: restoring and enhancing riparian function in the Anthropocene. Ecological Management & Restoration, 2018, 19(S1): 44-53.
- [3] 汪宗飞,郑粉莉.黄土高原子午岭地区人工油松林碳氮磷生态化学计量特征.生态学报,2018,38(19):6870-6880.
- [4] 李兴福,苏德荣,吕世海,布和,沃强,韩立亮,罗琰.呼伦贝尔草原辉河湿地不同淹水状态的土壤碳氮磷特征比较.生态学报,2018,38 (6):2204-2212.
- [5] 张晗, 欧阳真程, 赵小敏. 不同利用方式对江西省农田土壤碳氮磷生态化学计量特征的影响. 环境科学学报, 2019, 39(3): 939-951.
- [6] 王 启,李 艳,王连维,向蔓菁,袁大刚,邵帅,勾琪立. 成都东部"城-郊-乡"梯度绿地土壤碳氮磷化学计量特征.土壤, 2017, 49(2): 358-363.
- [7] 程欢, 宫渊波, 吴强, 李瑶, 刘颖, 朱德雯. 川西亚高山/高山典型土壤类型有机碳、氮、磷含量及其生态化学计量特征. 自然资源学报, 2018, 33(1): 161-172.
- [8] 田洪艳,周道玮,郭平.不同撂荒年限的草原农田土壤及植被的变化规律研究.东北师大学报:自然科学版,2001,33(4):72-77.
- [9] 成毅,安韶山,李国辉,李第红.宁夏黄土丘陵区植被恢复对土壤养分和微生物生物量的影响.中国生态农业学报,2010,18(2):261-266.
- [10] Allen D C, Wynn-Thompson T M, Kopp D A, Cardinale B J. Riparian plant biodiversity reduces stream channel migration rates in three rivers in Michigan, U.S.A. Ecohydrology, 2018, 11(4): e1972.
- [11] Atasoy M, Anderson C J, Guneysu Atasoy F. Evaluating the distribution of invasive woody vegetation around riparian corridors in relation to land use. Urban Ecosystems, 2018, 21(3): 459-466.
- [12] Baattrup-Pedersen A, Garssen A, Göthe E, Hoffmann C C, Oddershede A, Riis T, van Bodegom P M, Larsen S E, Soons M. Structural and functional responses of plant communities to climate change-mediated alterations in the hydrology of riparian areas in temperate Europe. Ecology and Evolution, 2018, 8(8): 4120-4135.
- [13] Busato L, Boaga J, Perri M T, Majone B, Bellin A, Cassiani G. Hydrogeophysical characterization and monitoring of the hyporheic and riparian zones: the Vermigliana Creek case study. Science of the Total Environment, 2019, 648: 1105-1120.
- [14] Ledesma J L J, Futter M N, Blackburn M, Lidman F, Grabs T, Sponseller R A, Laudon H, Bishop K H, Köhler S J. Towards an improved conceptualization of riparian zones in boreal forest headwaters. Ecosystems, 2018, 21(2): 297-315.
- [15] Gu S, Gruau G, Dupas R, Rumpel C, Crème A, Fovet O, Gascuel-Odoux C, Jeanneau L, Humbert G, Petitjean P. Release of dissolved phosphorus from riparian wetlands: evidence for complex interactions among hydroclimate variability, topography and soil properties. Science of the Total Environment, 2017, 598: 421-431.
- [16] 李永强,赵萌莉,韩国栋,焦树英.不同年限草原撂荒地土壤理化特性研究.中国草地学报,2012,34(3):61-69.
- [17] 郭二辉,云菲,冯志培,常海荣,杨喜田.河岸带不同植被格局对表层土壤养分分布和迁移特征的影响.自然资源学报,2016,31(7): 1164-1172.
- [18] Dybala K E, Matzek V, Gardali T, Seavy, N E. Carbon sequestration in riparian forests: A global synthesis and meta-analysis. Global change biology, 2019, 25(1): 57-67.
- [19] 朱桂林,山仑,刘国彬. 弃耕演替与恢复生态学. 生态学杂志, 2004, 23(6): 94-96.
- [20] Rumpel C, Kögel-Knabner I, Bruhn F. Vertical distribution, age, and chemical composition of organic carbon in two forest soils of different pedogenesis. Organic Geochemistry, 2002, 33(10): 1131-1142.

- [21] Baldock J A, Masiello C A, Gélinas Y, Hedges J I. Cycling and composition of organic matter in terrestrial and marine ecosystems. Marine Chemistry, 2004, 92(1/4): 39-64.
- [22] 赵娜, 孟平, 张劲松, 陆森, 程志庆. 华北低丘山地不同退耕年限刺槐人工林土壤质量评价. 应用生态学报, 2014, 25(2): 351-358.
- [23] 张超,刘国彬,薛萐,肖列.黄土丘陵区撂荒农耕地土壤有效态微量元素演变特征.中国农业科学,2013,46(18):3809-3817.
- [24] 张剑,宿力,王利平,包雅兰,陆静雯,高雪莉,陈涛,曹建军.植被盖度对土壤碳、氮、磷生态化学计量比的影响——以敦煌阳关湿地为例.生态学报,2019,39(2):580-589.
- [25] 张友,徐刚,高丽,刘书花,吕迎春.黄河三角洲新生湿地土壤碳氮磷分布及其生态化学计量学意义.地球与环境,2016,44(6): 647-653.
- [26] 许明祥, 王征, 张金, 刘国彬. 黄土丘陵区土壤有机碳固存对退耕还林草的时空响应. 生态学报, 2012, 32(17): 5405-5415.
- [27] 程滨,赵永军,张文广,安树青.生态化学计量学研究进展.生态学报,2010,30(6):1628-1637.
- [28] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, Melillo J M, Hall C A S. Pattern and variation of C:N:P ratios in China's soils: a synthesis of observational data. Biogeochemistry, 2010, 98(1/3): 139-151.
- [29] Li H, Li J, He Y L, Li S J, Liang Z S, Peng C H, Polle A, Luo Z B. Changes in carbon, nutrients and stoichiometric relations under different soil depths, plant tissues and ages in black locust plantations. Acta Physiologiae Plantarum, 2013, 35(10): 2951-2964.
- [30] Tischer A, Potthast K, Hamer U. Land-use and soil depth affect resource and microbial stoichiometry in a tropical mountain rainforest region of southern Ecuador. Oecologia, 2014, 175(1): 375-393.
- [31] 靖磊,周延,吕偲,赵君茹,雷光春.洞庭湖湿地3个林龄杨树人工林叶与土壤碳氮磷生态化学计量特征.生态学报,2018,38(18): 6530-6538.