

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.05.031.

刘晴虞, 王磊, 史经攀, 等. 平原沙土区河岸带不同植被类型对土壤氮组分及酶活性的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(5): 85-91.

LIU Qingyi, WANG Lei, SHI Jingpan, et al. Effects of Different Vegetation Types on Soil Nitrogen Fractions and Enzyme Activity in Riparian Zones of Plain Sandy Area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(5): 85-91.

## 平原沙土区河岸带不同植被类型对 土壤氮组分及酶活性的影响

刘晴虞<sup>1,2</sup>, 王磊<sup>1,2</sup>, 史经攀<sup>3</sup>, 陈斌<sup>1,2</sup>, 韩梦豪<sup>1,2</sup>, 关庆伟<sup>1,2</sup>

(1.南京林业大学 生物与环境学院, 南京 210037;

2.南方现代林业协同创新中心, 南京 210037; 3.丰县水利局, 江苏 徐州 221799)

**摘要:** [目的]明晰河岸带不同植被类型对土壤氮含量及酶活性的影响程度, 以为平原沙土区河岸带的植被构建和土壤养分固持提供依据。[方法]以江苏省平原沙土区丰县复新河河岸带 15 年生杨树纯林、柳树纯林和杨柳混交林为研究对象, 测定 5 个土层深度 (0—20 cm, 20—40 cm, 40—60 cm, 60—80 cm, 80—100 cm) 的氮组分含量及酶活性, 探讨不同植被类型中土壤氮含量和酶活性与土壤环境因子间的关系。[结果] (1) 各植被类型中, 土壤全氮、铵态氮、硝态氮和微生物生物量氮含量均高于对照, 60—100 cm 深层土壤氮含量在垂直分布上没有表现出明显规律。土壤全氮含量变化范围为 0.20~0.75 g/kg, 大小顺序为杨树纯林>柳树纯林>杨柳混交林, 总体上均随着土层深度的增加而降低, 在 0—20 cm 土层中的含量显著高于其他 4 个土层。土壤铵态氮和硝态氮含量在杨树纯林中最高, 且在杨树纯林中整体上随着土层深度的增加而降低。土壤微生物生物量氮含量在杨柳混交林中最高, 在杨树纯林中最低。 (2) 土壤脲酶、硝酸还原酶、亚硝酸还原酶活性变化范围为 0.30~4.35, 0.05~0.21, 0.46~0.59 mg/(g·d), 3 种酶活性在杨树纯林中最高, 在不同植被类型和土层中存在显著差异 ( $p<0.05$ )。 (3) 冗余分析表明土壤有机碳含量、细根生物量和凋落物生物量是影响土壤氮含量和酶活性的主导因子。[结论] 试验地杨树纯林由于土壤有机碳含量、细根生物量和凋落物生物量较高导致土壤氮含量和酶活性最高, 因此在平原沙土区河岸带选取适宜的植被类型可以提高土壤氮素的固持能力, 进而可能会减少土壤养分的流失。

**关键词:** 植被类型; 土壤氮含量; 酶活性; 河岸带; 平原沙土区

中图分类号: S714.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)05-0085-07

## Effects of Different Vegetation Types on Soil Nitrogen Fractions and Enzyme Activity in Riparian Zones of Plain Sandy Area

LIU Qingyi<sup>1,2</sup>, WANG Lei<sup>1,2</sup>, SHI Jingpan<sup>3</sup>, CHEN Bin<sup>1,2</sup>, HAN Menghao<sup>1,2</sup>, GUAN Qingwei<sup>1,2</sup>

(1.College of Biology and the Environment, Nanjing Forestry University,

Nanjing 210037, China; 2.Co-Innovation Center for the Sustainable Forestry in Southern China,

Nanjing 210037, China; 3.Feng County Water Conservancy Bureau, Xuzhou, Jiangsu 221799, China)

**Abstract:** [Objective] In purpose of providing a scientific basis for vegetation construction and soil nutrient sequestration in riparian zones in plain sandy area, this study investigated the effects of different vegetation types on soil N content and enzyme activity in riparian zones of Fuxin River in Feng County, Jiangsu Province. [Methods] Three 15-year-old riparian vegetation types, including pure poplar plantation, pure willow plantation and poplar-willow plantation, together with control (CK) were selected, and the nitrogen content and enzyme activity were measured at five soil depths (0—20 cm, 20—40 cm, 40—60 cm, 60—80 cm,

收稿日期: 2022-06-23

修回日期: 2022-07-26

资助项目: 江苏省水利科技项目“江苏省平原沙土区生态河道水土保持效果评价及措施优化配置技术研究”(2020054)

第一作者: 刘晴虞 (1999—), 女, 贵州瓮安人, 硕士研究生, 主要研究方向为城市森林生态。E-mail: 395273685@qq.com

通信作者: 关庆伟 (1964—), 男 (满族), 辽宁沈阳人, 教授, 主要从事森林生态系统结构、功能与过程等研究。E-mail: guanqian999@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

and 80—100 cm). [Results] (1) In all vegetation types, the total nitrogen contents, ammonia nitrogen contents, nitrate nitrogen contents, microbial biomass nitrogen contents of the four soil layers (except for soil layers  $\geq 60$  cm) were higher than those of CK. Soil total N contents varied from 0.20 to 0.75 g/kg (with a ranking of pure poplar plantation > pure willow plantation > poplar-willow plantation), and generally decreased with increasing soil layer depth, with a significant higher content in 0—20 cm. Soil ammonium and nitrate nitrogen contents were highest in pure poplar plantation, in which they declined along soil depth. Soil microbial biomass nitrogen content was the highest in poplar-willow plantation and lowest in pure poplar plantation. (2) Soil urease, nitrate reductase and nitrite reductase activities varied between 0.30~4.35, 0.05~0.21 and 0.46~0.59 mg/(g·d), respectively. The activities of the three enzymes were the highest in pure poplar plantation and differed significantly among vegetation types and soil layers ( $p < 0.05$ ). (3) Redundancy analysis showed that soil organic carbon content, fine root biomass and litter biomass were the dominant factors influencing soil N content and enzyme activity. [Conclusion] The highest soil nitrogen content and enzymatic activity were found in the pure poplar plantation, due to the high soil organic carbon content, fine root biomass and litter biomass. This implies that the selection of suitable vegetation types in the riparian zone of the plain sandy area can improve the soil nitrogen sequestration capacity, which in turn may reduce the loss of soil nutrients.

**Keywords:** vegetation type; soil nitrogen content; enzyme activity; riparian zone; plain sandy area

河岸带是陆地生态系统和水域生态系统的衔接地带,由于长期受到河水涨落和人类活动干扰,导致土壤养分流失和植被退化,增加了河流富营养化的风险<sup>[1-2]</sup>。研究发现,河岸带植被具有过滤径流中营养物质、调控土壤侵蚀、维持河岸稳定性等功能,合理的植被组成对河岸带生态功能的恢复具有不可替代的作用<sup>[3-4]</sup>。不同的植被类型通过影响凋落物生物量和土壤微生物群落组成,导致土壤有机质含量发生改变,进而对土壤氮素循环过程的变化发挥着关键作用<sup>[5]</sup>。

土壤氮含量及不同组分能受到经营措施<sup>[6]</sup>、土地利用变化<sup>[7]</sup>、植被类型等<sup>[2,8]</sup>的影响。Weintraub等<sup>[9]</sup>研究发现草地土壤的微生物生物量氮和硝态氮含量比林地更低。Wang等<sup>[10]</sup>发现杉木纯林土壤全氮和微生物生物量氮含量均低于杉木桉木混交林和杉木红松混交林。但也有研究发现在不同植被类型间土壤全氮和铵态氮含量并没有明显差异<sup>[2,8]</sup>。综上所述可以发现,不同植被类型对河岸带土壤氮含量的研究尚无定论。另外,土壤氮转化相关酶活性大小可以表征出土壤中氮素供给能力和转化的快慢,并且在一定程度上也可以体现出植物对氮素的吸收利用状况<sup>[11-12]</sup>。因此探讨河岸带不同植被类型对土壤氮含量及相关酶活性的影响很有必要。土层深度对土壤氮含量及酶活性的影响不可忽视,其可以间接作用于土壤理化性质,进而引起土壤氮含量及酶活性的改变<sup>[13]</sup>。弓文艳等<sup>[14]</sup>和徐国荣等<sup>[15]</sup>在0—40 cm深度的土壤中发现土壤氮组分含量和酶活性在土层间具

有明显差异,其随着土层深度的增加不断减少。上述说明了以往有关不同植被类型对土壤氮含量影响的研究多集中于表层土壤,有关深层土壤研究较少。然而,深层土壤中储存了一半以上的土壤氮含量,其与表层土壤理化性质、微生物群落结构等具有明显的差异<sup>[16]</sup>,深层土壤氮含量的变化规律如何尚不清楚。因此仍需对不同植被类型下土壤氮含量及酶活性的垂直分布特征进一步研究。

江苏省丰县属于黄河故道沙土区,故道两侧土质疏松,土粒间凝聚力小,在外力作用下极易造成水土、水肥流失<sup>[17]</sup>。以往该地区研究大多集中于植被措施<sup>[18]</sup>和生态河道建设等<sup>[19]</sup>对河岸带的优化,而关于平原沙土区不同植被类型对土壤养分的影响研究鲜有报道。为此,本研究选取江苏省平原沙土区丰县复新河河岸带杨树(*Populus euramevicana* cv. 464)纯林、柳树(*Salix × jiangsuensis* 'J172')纯林和杨柳混交林为研究对象,通过测定不同植被类型不同土层全氮、铵态氮、硝态氮、微生物生物量氮含量及土壤脲酶、硝酸还原酶、亚硝酸还原酶活性,探讨影响土壤氮组分含量及相关酶活性的因子,旨在明晰河岸带不同植被类型对土壤氮含量及酶活性的影响程度,以期为平原沙土区河岸带植被构建和土壤养分固持提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验地位于江苏省徐州市丰县复新河中游西岸

(116°21′—116°51′E, 34°24′—34°56′N), 属黄泛冲积平原, 地势平坦, 海拔 34.5~48.2 m。地处暖温带半湿润季风气候区, 四季分明, 春季天气多变, 夏季高温多雨, 秋季天高气爽, 冬季寒潮频袭, 日照充足, 多年平均气温 15.3℃, 多年平均降雨量为 630.4 mm, 无霜期为 200 d 左右。试验地土壤类型以微碱性潮土为主<sup>[20]</sup>, 土壤湿润, 土质分布均匀, 周边区域以农业为主。主要乔木树种有杨树、柳树、泡桐 (*Paulownia tomentosa*)、构树 (*Broussonetia papyrifera*)、女贞 (*Ligustrum lucidum*)。

1.2 样地设置

试验地为 2006 年河道整治形成的立地条件相近的河岸缓冲带, 宽约 40 m, 长约 6 km, 沿河道依次营

造长 2 km 林龄相同的杨树纯林、柳树纯林和杨柳混交林。杨树品种为“46-杨”, 柳树品种为“苏柳 172”, 林龄为 15 a, 初始营造密度为 500 株/hm<sup>2</sup>。3 种植被类型下皆有天然更新的灌木和草本, 其中灌木主要有枸杞 (*Lycium chinense*)、苕麻 (*Boehmeria nivea*) 等; 草本植物主要有狗尾草 (*Setaria viridis*)、沼生水马齿 (*Callitriche palustris*)、酢浆草 (*Oxalis corniculata*) 等, 但样地中灌木和草本的盖度皆不超过 20%。在每种植被类型中随机布设 3 个面积为 20 m×20 m 的标准样地, 每个样地间距大于 300 m。根据试验地踏勘情况, 设置撂荒地作为对照, 样地布设同上, 撂荒地植被以狗尾草等草本植物为主。试验地基本概况见表 1。

表 1 试验地基本概况

植被类型	乔木密度/ (株·hm <sup>-2</sup> )	平均 胸径/cm	平均高/ m	郁闭度	凋落物 厚度/cm	凋落物生物量/ (t·hm <sup>-2</sup> )	细根生物量/ (t·hm <sup>-2</sup> )
PPP	500	28.8±1.6	16.8±0.6	0.90	2.2	12.89±0.01	8.69±0.55
PWP	500	14.9±2.3	7.2±0.4	0.40	1.3	8.85±2.61	4.66±0.63
PWM	500	22.3±4.5	13.5±1.5	0.70	1.5	9.99±0.76	4.12±0.74
CK	—	—	—	—	0.2	2.86±1.38	1.14±0.04

注: PPP 表示杨树纯林; PWP 表示柳树纯林; PWM 表示杨柳混交林; CK 表示对照地, 下同。

1.3 样品采集及测定

采样时间为 2022 年 3 月。在每个标准样地内, 除去地面凋落物和草本植物, 按“S”型选取 5 个采样点挖取 1 m 深土壤剖面, 采集 0—20 cm, 20—40 cm, 40—60 cm, 60—80 cm, 80—100 cm 共 5 个土壤层次的土样, 并将每层取样点土样按照四分法混合后作为该层土壤待测样品, 用镊子仔细去除土壤中的根系, 过 2 mm 细筛备用。将每个样地土壤样品分为 2 份, 一份装入自封袋放入冰箱, 于 0~4℃ 保存, 用于土壤硝态氮、铵态氮和微生物生物量氮的测定; 一份经风干、过 100 目细筛等处理用于土壤基本理化性质的测定。

土壤基本理化性质测定参照常规分析方法<sup>[21]</sup>:

土壤容重采用环刀法 (100 cm<sup>3</sup>) 于土壤剖面每个层次采集原状土壤样品烘干测定; 土壤 pH 值 (水土比 1:2.5) 采用 pH 计 (pHS-3C) 测定; 细根生物量和凋落物生物量采用烘干称量法测定; 土壤全氮采用元素分析仪 (Vario Element III, Germany) 测定; 土壤硝态氮采用 KCl 浸提—双波长比色法测定; 土壤铵态氮采用 KCl 浸提—靛酚蓝比色法测定; 土壤微生物生物量氮采用氯仿熏蒸—K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 浸提法; 土壤酶活性测定参照关松荫<sup>[22]</sup>的分析方法, 脲酶活性采用靛酚蓝比色法测定, 硝酸还原酶活性采用嫌气培养—酚二磺酸比色法测定, 亚硝酸还原酶活性采用格里试剂显色与酶促反应前后 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 变化表征, 样地基本理化性质见表 2。

表 2 试验地土壤理化性质

植被类型	温度/℃	pH	含水率/%	容重/ (g·cm <sup>-3</sup> )	土壤有机碳/ (g·kg <sup>-1</sup> )
PPP	12.11±0.63	8.27±0.10	20.75±1.42	1.64±0.03	3.59±0.34
PWP	12.60±0.55	8.39±0.04	20.09±1.40	1.66±0.03	2.87±0.31
PWM	11.91±0.22	8.21±0.13	22.19±1.05	1.64±0.03	2.87±0.29
CK	11.73±0.27	8.09±0.02	23.94±1.25	1.63±0.03	1.97±0.38

1.4 数据统计与分析

采用 Excel 2016 软件进行数据整理和校对, 使用 SPSS 21.0 软件进行相关性分析和差异显著性检验, 利用 Origin 9.2 软件进行图表处理。图表中数据为平均值±标准误差。

2 结果与分析

2.1 不同植被类型土壤氮组分含量变化

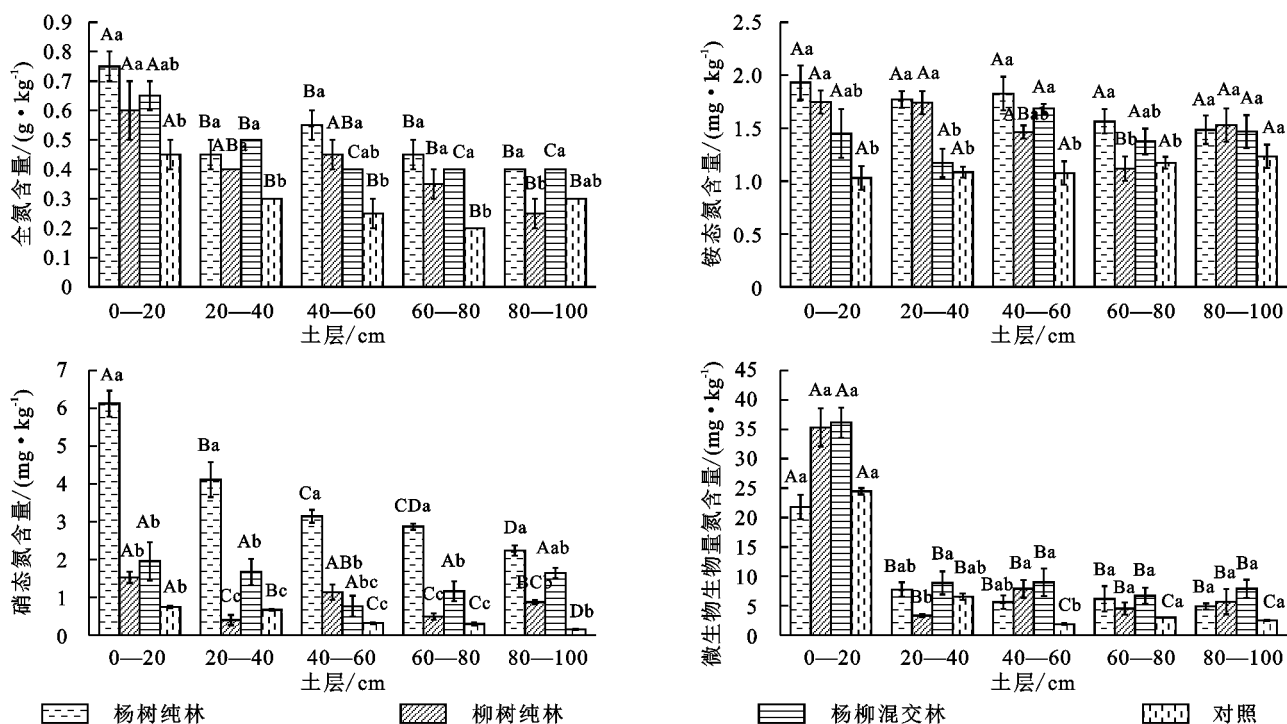
如图 1 所示, 各植被类型中, 4 种土壤氮含量均高于对照, 60—100 cm 深层土壤氮组分含量在土层间没有表

现出明显规律。各植被类型土壤全氮含量为 0.20~0.75 g/kg,在植被类型和土层间存在极显著差异( $p<0.01$ ),各植被类型土壤全氮含量为杨树纯林>柳树纯林>杨柳混交林。整体上均随着土层深度增加而降低,0—20 cm 土层全氮含量均显著高于其他 4 个土层( $p\geq 0.05$ )。

3 种植被类型土壤铵态氮含量为 1.12~1.93 mg/kg,在植被类型中存在极显著差异( $p<0.01$ ),杨树纯林中最高,杨柳混交林中最低。土壤铵态氮含量随着土层深度呈下降趋势,但是土层间差异不显著( $p\geq 0.05$ )。土壤硝态氮含量为 0.4~6.12 mg/kg,在植被类型和土层间存在极显著差异( $p<0.01$ )。土壤

硝态氮含量在杨树纯林中最高,柳树纯林中最低。杨树纯林土壤硝态氮含量随着土层深度增加而降低,柳树纯林及杨柳混交林含量整体上先降低后增加。

土壤微生物生物量氮含量为 3.32~36.14 mg/kg,在植被类型及土层存在极显著差异( $p<0.01$ ),不同植被类型大小顺序为杨柳混交林>柳树纯林>杨树纯林。各植被类型 0—20 cm 土层微生物生物量氮含量均显著高于其他 4 个土层。杨柳混交林土壤微生物生物量氮含量在土壤剖面上整体上呈现随土层深度增加先降低后增加的趋势;杨树纯林和柳树纯林整体上含量先降低后增加再降低。



注:不同大写字母表示不同土层存在差异显著( $p<0.05$ );不同小写字母表示不同植被类型间存在差异显著( $p<0.05$ ),下同。

图1 不同植被类型土壤氮含量变化

## 2.2 不同植被类型土壤氮循环相关酶活性变化

由图2可知,随着土层深度逐渐增加,各植被类型土壤酶活性在 60—100 cm 土层间不存在明显规律。杨树纯林和杨柳混交林土壤脲酶活性高于对照,柳树纯林脲酶活性低于对照。不同植被类型土壤脲酶活性变化范围为 0.30~4.35 mg/(g·d),杨树纯林>杨柳混交林>柳树纯林。土壤脲酶活性在植被类型和土层间具有显著差异( $p<0.05$ ),3 种植被类型土壤脲酶活性在 0—20 cm 和 20—40 cm 土层出现急剧下降,整体上随着土层深度增加而降低。

3 种植被类型土壤亚硝酸还原酶活性高于对照,活性变化范围为 0.46~0.59 mg/(g·d),土层间无显著差异( $p\geq 0.05$ ),植被类型间具有极显著差异( $p<0.01$ )。杨树纯林、柳树纯林和杨柳混交林土壤亚硝酸还原酶活性分别比对照提高了 17.42%,11.46%和 8.67%。杨树

纯林和柳树纯林土壤硝酸还原酶活性高于对照,杨柳混交林硝酸还原酶活性低于对照。土壤硝酸还原酶活性为 0.05~0.21 mg/(g·d),在植被类型和土层间均具有极显著差异( $p<0.01$ )。各植被类型 0—20 cm 土层硝酸还原酶活性与其他 4 个土层具有显著差异( $p<0.05$ ),杨树纯林土壤硝酸还原酶活性整体上随土层深度增加而降低,且杨树纯林土壤硝酸还原酶活性在 0—20 cm 土层显著高于其他 2 种植被类型( $p<0.05$ )。

## 2.3 土壤氮组分含量与酶活性的相关性

由表3可以看出,土壤氮含量和酶活性存在正相关关系。土壤全氮、硝态氮含量与 3 种酶活性呈极显著正相关关系( $p<0.01$ );土壤铵态氮含量与土壤硝酸还原酶活性呈显著正相关( $p<0.05$ ),与土壤亚硝酸还原酶活性呈极显著正相关关系( $p<0.01$ );土壤微生物生物量氮和土壤脲酶、硝酸还原酶活性呈极显著正相关( $p<0.01$ ),



与亚硝酸还原酶活性呈显著正相关( $p<0.05$ )。

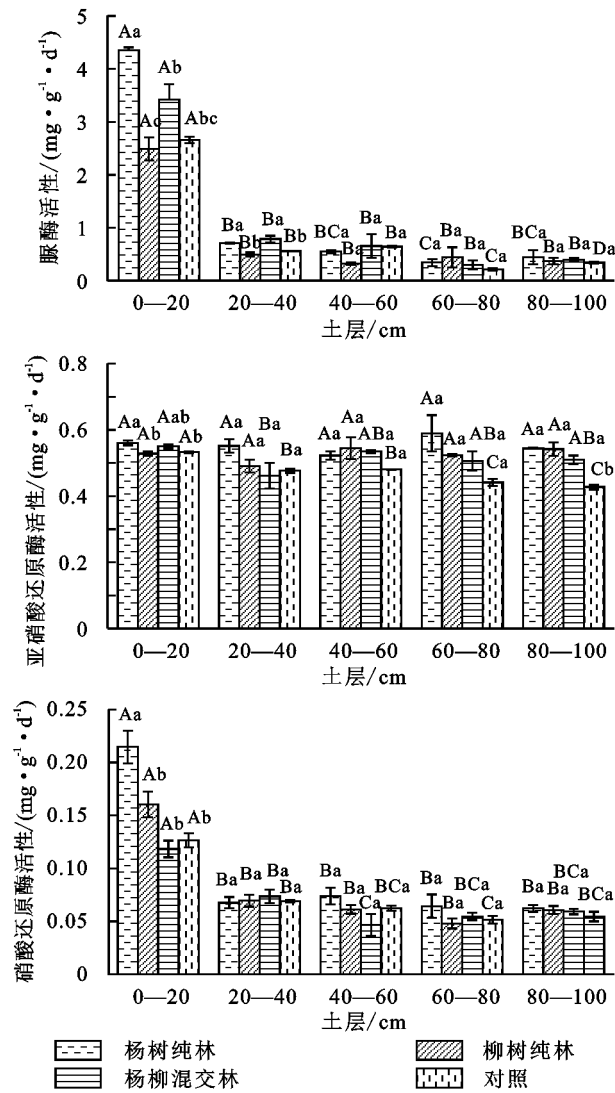


图 2 不同植被类型土壤氮循环相关酶活性的变化

表 3 土壤氮含量与酶活性的相关系数

指标	TN	$\text{NH}_4^+-\text{N}$	$\text{NO}_3^--\text{N}$	MBN
S-UE	0.721 **	0.239	0.503 **	0.831 **
S-NR	0.707 **	0.326 *	0.574 **	0.721 **
S-NiR	0.398 **	0.385 **	0.471 **	0.274 *

注:TN 为全氮; $\text{NH}_4^+-\text{N}$  为铵态氮; $\text{NO}_3^--\text{N}$  为硝态氮;MBN 为微生物生物量氮;S-UE 为土壤脲酶;S-NR 为土壤硝酸还原酶;S-NiR 为土壤亚硝酸还原酶; \*\* 表示极显著相关( $p<0.01$ ); \* 表示显著相关( $p<0.05$ ),下同。

2.4 土壤氮组分含量、酶活性与土壤环境因子的相关性分析

由表 4 可以看出,土壤氮含量、酶活性与土壤 pH、温度、细根生物量、凋落物生物量、土壤有机碳含量呈正相关关系,与土壤容重、土壤含水率呈负相关关系。其中,土壤 pH 与硝态氮呈极显著正相关( $p<0.01$ ),与土壤全氮、微生物生物量氮、脲酶、硝酸还原酶呈显著正相关( $p<0.05$ );土壤温度与微生物生物量氮、脲酶、硝酸还原酶呈极显著正相关( $p<0.01$ );土壤容重与全氮、微生物生物量氮、脲酶、硝酸还原酶呈极显著负相关( $p<0.01$ );土壤含水率与铵态氮、亚硝酸还原酶呈显著负相关( $p<0.05$ ),与其余氮含量及酶活性呈极显著负相关( $p<0.01$ );细根生物量与土壤亚硝酸还原酶呈显著正相关( $p<0.05$ ),与其余氮含量及酶活性呈极显著正相关( $p<0.01$ );郁闭度与土壤全氮呈显著正相关( $p<0.05$ ),与硝态氮呈极显著正相关( $p<0.01$ );土壤有机碳与氮含量、酶活性呈极显著正相关( $p<0.01$ );凋落物生物量与土壤全氮、硝态氮、铵态氮、亚硝酸还原酶呈极显著正相关( $p<0.01$ )。

表 4 土壤氮组分含量、酶活性与土壤环境因子的相关系数

指标	pH	T	BD	WC	RB	CD	SOC	LB
TN	0.286 *	0.225	-0.339 **	-0.560 **	0.747 **	0.298 *	0.745 **	0.549 **
$\text{NH}_4^+-\text{N}$	0.331 **	0.076	-0.143	-0.258 *	0.358 **	0.237	0.388 **	0.640 **
$\text{NO}_3^--\text{N}$	0.118	0.123	-0.185	-0.349 **	0.652 **	0.707 **	0.594 **	0.692 **
MBN	0.263 *	0.458 **	-0.417 **	-0.474 **	0.697 **	-0.062	0.763 **	0.101
S-UE	0.277 *	0.367 **	-0.494 **	-0.479 **	0.849 **	0.152	0.840 **	0.117
S-NR	0.261 *	0.417 **	-0.508 **	-0.500 **	0.882 **	0.124	0.815 **	0.155
S-NiR	0.219	0.224	-0.111	-0.279 *	0.277 *	0.223	0.511 **	0.569 **

注:SOC 表示土壤有机碳;T 表示土壤温度;WC 表示含水率;BD 表示土壤容重;pH 表示氢离子浓度;RB 表示细根生物量;LB 表示凋落物生物量;CD 表示郁闭度。

3 讨论

3.1 不同植被类型对土壤氮组分含量及酶活性的影响

参照全国第二次土壤普查养分分级标准<sup>[23]</sup>,试验区 0—20 cm 土层全氮处于低水平(5 级),20—100 cm 土壤全氮处于极低水平(6 级),表明平原沙土区

土壤氮素水平较低,植物生长受到限制。本研究中土壤氮含量在植被类型间存在显著差异,并且营造人工林能够改善土壤氮素水平,减少土壤氮的流失,这与多人研究结果类似<sup>[24-25]</sup>。不同植物对土壤氮含量的吸收在时间、空间或化学形式上存在差异<sup>[26]</sup>。杨树是典型速生树种,适生性很强,且研究区为水陆交错

地带,土壤含水量较高,能更好地促进杨树生长。并且杨树纯林中较高的凋落物和细根生物量(表1)与土壤氮含量间呈极显著正相关(表4),促进了土壤有机质的输入,提高了土壤养分输入和供氮能力,进而增加了土壤氮库<sup>[27]</sup>。细根的周转和分泌可以向土壤中释放大量的碳基质和胶结物质,不仅增加了根际微生物的活性和富集,还能进一步促进土壤团聚体的形成,通过改善土壤结构增加土壤氮含量<sup>[28]</sup>。同时,较高的有机质含量也可以提供酶促反应所需的底物、场所和适宜的条件,进而促进土壤酶的合成<sup>[29]</sup>,导致本试验地杨树纯林土壤全氮含量和酶活性最高。

本研究中土壤硝态氮和铵态氮含量随着植被类型的改变而变化,土壤微生物生物量氮含量在杨柳混交林最高,这与闫加亮等<sup>[30]</sup>和董敏慧等<sup>[31]</sup>的研究结果一致。这可能与树种有关,不同植物对氮组分的吸收利用效率不同<sup>[15]</sup>,并且植被组成复杂的杨柳混交林总体上具有比纯林更为复杂的功能性状,对提升土壤微生物生物量、改变微生物群落结构和代谢特征等也更为有效<sup>[32]</sup>。另外,细菌和真菌浓度也都可以显著地改变土壤微生物生物量氮含量<sup>[33]</sup>,但本文没有进行土壤微生物群落结构和代谢特征等的相关研究,在今后的研究中需进一步探讨其中的相关关系。本研究中,3种土壤酶活性在植被类型间存在显著差异,这与胡宗达等<sup>[34]</sup>的研究结果一致。这是因为不同的植被类型下植物根系组成和分泌物不同,同时凋落物数量和质量等差异也较大,导致了土壤物理特性、养分含量以及土壤微生物活性发生变化,进而影响土壤酶活性的变化<sup>[35-36]</sup>。

### 3.2 土层深度对土壤氮组分含量及酶活性的影响

本研究中3种植被类型土壤氮组分含量变化具有明显的垂直分布特征,整体上随土层深度的增加而降低,0—20 cm土层氮组分含量高于其他4个土层,这与人研究结果基本一致<sup>[14,24,30]</sup>。由此可以看出,土壤氮组分含量主要集中在土壤表层,具有表层聚集现象。土壤氮含量在土壤中的变化不仅受到土壤母质的影响,还受到动植物残体、凋落物分解、根系分泌和微生物群落结构等的影响<sup>[24]</sup>。土壤表层聚集了大量的枯枝落叶和植物根系,分布了具有固氮作用的微生物和植物根瘤菌,而且相较于其他土层其水热条件和通气状况更好,微生物活性和酶促反应速度增强,有利于土壤微生物的生长繁殖,促进氮素矿化作用<sup>[37]</sup>。并且有机碳含量对土壤氮含量具有积极影响(表4),说明土壤有机质水平在本样地中决定着土壤氮素水平。随着土层深度的不断增加,有机质输入能力越来越弱,深层土壤微生物能够获得的养分来源有限,这也

使得土壤氮组分含量随土层深度的增加而降低。

土壤脲酶和硝酸还原酶活性同样也具有表层聚集现象,在土壤垂直空间结构上整体随着土层深度的增加而降低,这可能与表层具有较多的枯枝落叶和植物根系、土壤养分含量较高以及微生物群落的数量和活性显著高于深层土壤有关<sup>[16]</sup>。另外,土壤氮素水平对土壤脲酶活性与硝酸还原酶活性具有积极作用(表3),土壤酶活性的垂直分布规律很可能受到土壤养分分布规律的影响。但本研究中,深层土壤( $\geq 60$  cm)氮组分含量和酶活性在垂直分布上没有表现出明显规律,这是因为深层土壤养分主要来自于根系分泌物和土壤微生物<sup>[38]</sup>,而本研究区植物根系普遍分布于0—60 cm土层, $\geq 60$  cm的土壤容重较高和通透性较弱,阻碍了根系向下延展,抑制了土壤微生物生长和繁殖。

## 4 结论

综上所述,杨树纯林可以通过增加凋落物和细根生物量来促进土壤有机碳含量,进而提高土壤氮含量和酶活性,减缓土壤养分流失。土壤氮含量与酶活性具有明显的相关关系,土壤氮组分含量及脲酶、硝酸还原酶活性整体上都随着土层深度的增加而降低。因此,在苏北平原沙土区河岸带植被构建中,杨树纯林有利于提高河岸带表层土壤氮含量及深层土壤氮含量的稳定性,强化土壤养分固持作用,进而减缓该区域土壤养分流失。

### 参考文献:

- [1] Hale R, Reich P, Daniel T, et al. Assessing changes in structural vegetation and soil properties following riparian restoration [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2018, 252: 22-29.
- [2] 张灿强,张彪,杨艳刚,等.太湖上游西苕溪近岸森林土壤氮磷养分差异特征[J].*水土保持学报*, 2011, 25(5): 53-58.
- [3] Baskerville M, Reddy N, Ofori E, et al. Vegetation type does not affect nitrous oxide emissions from riparian zones in agricultural landscapes [J]. *Environmental Management*, 2021, 67(2): 371-383.
- [4] Pinay G, Bernal S, Abbott B W, et al. Riparian corridors: A new conceptual framework for assessing nitrogen buffering across biomes [J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2018, 6, Doi:org/10.3389/fenvs.2018.00047.
- [5] Prescott C E, Preston C M. Nitrogen mineralization and decomposition in forest floors in adjacent plantations of western red cedar, western hemlock, and Douglas-fir [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1994, 24(12): 2424-2431.

- [6] 杨传宝,倪惠菁,苏文会,等.经营措施对毛竹林土壤不同组分有机碳、氮及化学结构的影响[J].应用生态学报,2020,31(1):25-34.
- [7] Zhang Q, Zhang D, Wu J, et al. Soil nitrogen-hydrolyzing enzyme activity and stoichiometry following a sub-tropical land use change [J]. *Land Degradation & Development*, 2021,32(15):4277-4287.
- [8] Omidvar N, Xu Z, Nguyen T, et al. A global meta-analysis shows soil nitrogen pool increases after revegetation of riparian zones [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2021,21(2):665-677.
- [9] Weintraub S R, Brooks P D, Bowen G J. Interactive effects of vegetation type and topographic position on nitrogen availability and loss in a temperate montane ecosystem [J]. *Ecosystems*, 2017,20(6):1073-1088.
- [10] Wang Q K, Wang S L. Soil microbial properties and nutrients in pure and mixed Chinese fir plantations [J]. *Journal of Forestry Research*, 2008,19(2):131-135.
- [11] 孙瑞莲,赵秉强,朱鲁生,等.长期定位施肥对土壤酶活性的影响及其调控土壤肥力的作用[J].植物营养与肥料学报,2003,9(4):406-410.
- [12] 周礼恺.土壤的酶活性[J].土壤学进展,1980,8(4):9-15.
- [13] 宋思意,吕思扬,邱岭军,等.华西雨屏区常绿阔叶林不同深度土壤氮矿化及相关土壤酶活性对模拟氮沉降的响应[J].生态学报,2022,42(22):9045-9056.
- [14] 弓文艳,陈丽华,郑学良.基于不同林分类型下土壤碳氮储量垂直分布[J].水土保持学报,2019,33(1):152-157,164.
- [15] 徐国荣,马维伟,宋良翠,等.植被不同退化状态下杂海湿地土壤氮含量及酶活性特征[J].生态学报,2020,40(24):8917-8927.
- [16] Chen D, Saleem M, Cheng J, et al. Effects of aridity on soil microbial communities and functions across soil depths on the Mongolian Plateau [J]. *Functional Ecology*, 2019,33:1561-1571.
- [17] 金兆森,陶涛.江苏省平原沙土地区水土保持措施及其作用[J].水土保持研究,2005,12(5):119-121.
- [18] 黄明逸,朱成立,韩以振,等.江苏省黄河故道沙土区植被措施因子试验分析[J].水土保持研究,2017,24(1):140-144.
- [19] 徐蛟,王良杰.江苏省平原沙土区河道生态提升建设探索[J].中国水利,2020(23):42-43.
- [20] 全国土壤普查办公室.中国土种志[M].北京:中国农业出版社,1993.
- [21] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000.
- [22] 关松荫.土壤酶及其研究法[M].北京:中国农业出版社,1986.
- [23] 全国土壤普查办公室.中国土壤普查技术[M].北京:中国农业出版社,1992.
- [24] 惠昊,关庆伟,王亚茹,等.不同森林经营模式对土壤氮含量及酶活性的影响[J].南京林业大学学报:自然科学版,2021,45(4):151-158.
- [25] 王娟娟,朱莎,靳士科,等.上海市3种森林类型土壤微生物生物量碳和氮的时空格局[J].生态与农村环境学报,2016,32(4):615-621.
- [26] Chen X L, Chen, H Y H, et al. Negative to positive shifts in diversity effects on soil nitrogen over time [J]. *Nature Sustainability*, 2020,4(3):225-234.
- [27] Liu R, Zhou X, Wang J, et al. Differential magnitude of rhizosphere effects on soil aggregation at three stages of subtropical secondary forest successions [J]. *Plant and Soil*, 2019,436:365-380.
- [28] 谢君毅,徐侠,蔡斌,等.“碳中和”背景下碳输入方式对森林土壤活性氮库及氮循环的影响[J].南京林业大学学报:自然科学版,2022,46(2):1-11.
- [29] 谷晓楠,贺红土,陶岩,等.长白山土壤微生物群落结构及酶活性随海拔的分布特征与影响因子[J].生态学报,2017,37(24):8374-8384.
- [30] 闫加亮,范志平,孙学凯,等.小流域内植被类型对土壤  $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$  空间变化的影响[J].生态学报,2012,31(8):2044-2049.
- [31] 董敏慧,张良成,文丽,等.松树—樟树混交林、纯林土壤微生物量碳、氮及多样性特征研究[J].中南林业科技大学学报,2017,37(11):146-153.
- [32] 张贾宇,余婷,鄂晓伟,等.杨树人工林幼林阶段林下植被管理对土壤微生物生物量碳、氮酶活性的影响[J].生态学报,2021,41(24):9898-9909.
- [33] Heuck C, Weig A, Spohn M. Soil microbial biomass C: N: P stoichiometry and microbial use of organic phosphorus [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 85:119-129.
- [34] 胡宗达,刘世荣,罗明霞,等.川西亚高山不同演替阶段天然次生林土壤碳氮含量及酶活性特征[J].植物生态学报,2020,44(9):973-985.
- [35] 罗琰,苏德荣,吕世海,等.辉河湿地河岸带土壤养分与酶活性特征及相关性研究[J].土壤,2017,49(1):203-207.
- [36] Lucas-Borja M E, Delgado-Baquerizo M. Plant diversity and soil stoichiometry regulates the changes in multifunctionality during pine temperate forest secondary succession [J]. *Science of the Total Environment*, 2019,697:134204.
- [37] 卢虎,姚拓,李建宏,等.高寒地区不同退化草地植被和土壤微生物特性及其相关性研究[J].草业学报,2015, 24(5):34-43.
- [38] Clemmensen K E, Bahr A, Ovaskainen O, et al. Roots and Associated Fungi Drive Long-Term Carbon Sequestration in Boreal Forest [J]. *Science*, 2013,339 (6127):1615-1618.