

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2026.01.017; CSTR:32311.14.rswc.2026.01.017.

王振坤, 于子涵, 郑子成, 等. 土壤团聚体有机氮与氮转化酶对植茶品种响应[J]. 水土保持研究, 2026, 33(1):136-144.

Wang Zhenkun, Yu Zihan, Zheng Zicheng, et al. Response of soil aggregate organic nitrogen and nitrogen transformation enzymes to tea cultivars[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2026, 33(1):136-144.

土壤团聚体有机氮与氮转化酶对植茶品种响应

王振坤, 于子涵, 郑子成, 李廷轩, 张锡洲

(四川农业大学 资源学院, 成都 611130)

摘要: [目的] 探究种植不同茶树品种土壤有机态氮与氮转化酶活性的关系, 为评价茶园土壤氮素转化及氮素供应能力提供理论依据。[方法] 通过野外调查和室内分析方法, 研究不同茶树品种(福鼎大白、川茶 3 号、川农黄芽早和川沐 217)土壤团聚体中有机态氮含量与氮转化酶活性, 并探讨了两者关系。[结果] 种植福鼎大白和川农黄芽早的土壤酸解性全氮、氨基酸态氮、酸解铵态氮、氨基糖态氮显著高于其他茶树品种, 酸解未知态氮的变化趋势则相反。各植茶品种土壤酸解未知态氮含量主要集中在小粒径团聚体中为 0.15~0.19 g/kg, 其他形态的变化趋势则相反。种植川茶 3 号土壤蛋白酶、脲酶活性显著低于其他茶树品种。不同植茶品种土壤蛋白酶、脲酶活性在 <0.25 mm 粒径团聚体中最高, 分别为 51.19~75.87 mg/(kg·h), 31.90~59.70 mg/(kg·h)。不同植茶品种土壤团聚体脲酶和蛋白酶对不同组分有机氮含量的存在不同程度影响。[结论] 种植福鼎大白茶园土壤和川农黄芽早土壤有机氮含量高于其他植茶品种, 且土壤氮转化酶活性较高, 表明这两个茶树品种土壤供氮能力较强, 对维持研究区茶园土壤氮循环具有重要现实的意义。

关键词: 有机氮; 氮转化酶; 水稳性团聚体; 植茶品种

中图分类号: S152.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)01-0136-09

Response of soil aggregate organic nitrogen and nitrogen transformation enzymes to tea cultivars

Wang Zhenkun, Yu Zihan, Zheng Zicheng, Li Tingxuan, Zhang Xizhou

(College of Resources, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

Abstract: [Objective] This study investigates the relationship between soil organic nitrogen and nitrogen transformation enzyme activities in soils under different tea cultivars, providing a theoretical basis for evaluating nitrogen transformation and supply capacity in tea plantation soils. [Methods] Through field investigation and laboratory analyses, the contents of organic nitrogen and activities of nitrogen transformation enzymes in soil aggregates were examined for four tea cultivars (Fuding Dabai, Chuancha No. 3, Chuannong Huangyazao and Chuanmu No. 217), and their relationships were explored. [Results] Soils planted with Fuding Dabai and Chuannong Huangyazao exhibited significantly higher levels of acid-hydrolyzable total nitrogen, amino acid nitrogen, acid-hydrolyzable ammonium nitrogen, and amino sugar nitrogen compared to other tea cultivars, while acid-hydrolyzable unknown nitrogen showed an opposite trend. Acid-hydrolyzable unknown nitrogen was mainly concentrated in small-sized aggregates (0.15~0.19 g/kg) across cultivars, whereas other nitrogen forms showed opposite trends. The soil protease and urease activities in soils under Chuancha No. 3 were significantly lower than those in soils under other cultivars. For different tea cultivars, protease and urease activities were highest in aggregates with particle size <0.25 mm, ranging from 51.19~75.87 mg/(kg·h) and 31.90~59.70 mg/(kg·h), respectively. The urease and protease activities in soil aggregates of different tea cultivars exhibited varying

收稿日期: 2025-02-22

修回日期: 2025-04-21

接受日期: 2025-05-05

资助项目: 四川重点研发计划项目“成都平原区重金属污染耕地安全利用综合技术集成与示范”(2017SZ0188)

第一作者: 王振坤(1999—), 男, 宁夏银川人, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤侵蚀及环境效应研究。E-mail: wangzhenkun02@163.com

通信作者: 郑子成(1976—), 男, 内蒙古乌兰察布人, 教授, 博士研究生导师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: zichengzheng@aliyun.com

<http://stbcjy.paperonice.org>

degrees of influence on the contents of different organic nitrogen fractions. [Conclusion] Soils under Fuding Dabai and Chuannong Huangyazao cultivars contain higher contents of organic nitrogen and exhibit greater activities of soil nitrogen transformation enzymes compared to soils under other tea cultivars, indicating their stronger soil nitrogen supply capacity. These findings hold significant practical implications for maintaining nitrogen cycling in tea plantation soils within the study area.

Keywords: organic nitrogen; nitrogen transformation enzymes; water-stable aggregates; tea cultivars

氮是茶树生长发育所必需的营养元素^[1],是限制茶园生态系统生产的重要部分^[2]。因此,土壤氮素的研究备受关注^[3]。土壤氮素主要以有机氮的形态存在^[4],是土壤全氮的主体。有机氮在维持土壤矿质氮供应能力方面具有重要的意义。研究表明,施用氮肥显著增加了农田土壤总氮和有机氮含量,其中酸解氨基糖氮和酸解氨态氮增幅最大,这强调了有机氮在维持土壤矿质氮供应能力方面的重要作用^[5]。然而,有机氮通过矿化作用转化为铵态氮、硝态氮等植物可利用形态,这一过程高度依赖于土壤酶系统的驱动^[6]。酶系统是土壤生理生化特性的重要组成部分,土壤酶活性可作为土壤质量的生物活性指标^[7]。作为参与土壤氮素循环常见的氮转化酶,脲酶能够酶促尿素水解生产氨,蛋白酶可将蛋白质肽链水解生产氨基酸^[8],从而促使土壤有机氮向植物有效态转化。近年来,有研究表明,蛋白酶活性与氮矿化程度呈高度相关,脲酶活性可以用来表征土壤氮素的供应能力。因此氮转化酶通过调控土壤有机氮的分解转化,成为连接土壤氮库与茶树养分吸收的核心纽带。

土壤团聚体是构成土壤结构的基本组成单元,对土壤有机氮蓄积,提高土壤潜在氮素肥力具有重要影响^[9]。有研究表明土壤团聚体有机氮主要以酸解性铵态氮为主,氨基糖态氮最少,但不同粒径团聚体及所占比例影响土壤的氮素肥力以及土壤供氮能力^[10]。不同粒径的团聚体中,有机氮的组成和有效性存在差异。大团聚体(>2 mm)通常含有更多未分解的有机质,以酸解氨基糖态氮(Acid-hydrolyzable Amino Sugar Nitrogen, ASN)为主;而微团聚体(<0.25 mm)中酸解铵态氮(Acid-hydrolyzable Ammonia Nitrogen, ANN)和酸解氨基酸态氮(Amino Acid Nitrogen, AAN)的比例较高,这些组分更易被微生物利用并转化为有效氮^[11]。目前对土壤团聚体有机态氮含量和氮转化酶活性的研究已有大量报道;但由于有机氮不同形态其氮转化能力也各异^[12],且氮转化酶对有机氮形态转化的影响存在差异。

因此本研究以川西低山丘陵区4种主栽植茶品种土壤为研究对象,探讨土壤团聚体有机态氮含量以及氮转化酶活性的分布特征,阐明有机态氮组成与氮

转化酶活的关系,对于明晰植茶土壤氮素转化,提高茶树品质有着重要的现实意义,以期为实现茶园生态系统氮素良性循环及茶园土壤可持续利用提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于四川省雅安市名山区中峰镇万亩观光茶园(103°11'42"—103°12'02"E, 30°12'04"—30°12'43"N),属亚热带湿润气候。年平均气温15.4℃;年均降水量1500 mm左右。地貌以丘陵台地为主,土壤类型为第四纪老冲积物发育而成的黄壤。每年11月上旬沿树冠边缘垂直底部挖沟,施入K₂SO₄型复合肥(N:P₂O:K₂O=20:8:8)15 t/hm²,最后覆土。追肥于次年2月初、4月下旬、7月上旬进行。追肥量分别为300,225,225 kg/hm²。茶树行距(150±15)cm,株距(30±15)cm。每品种茶园面积约为250 m²,各品种茶园相隔距离约为1.5 m。

1.2 土样采集与处理

综合考虑研究区各茶园地质条件和管理措施等,选择成土母质相同、地形地貌相似、茶园管理相近、植茶时间较为一致的福鼎大白(FD)、川茶3号(CC)、川沐217(CM)、川农黄芽早(CN)为研究对象,其中福鼎大白为半乔木型,高度约70 cm,冠幅110 cm;川茶3号为灌木型,高度约60 cm,冠幅约85 cm;川沐217为半乔木型,高度约80 cm,冠幅约100 cm;川农黄芽早为灌木型,高度约60 cm,冠幅约90 cm。于2020年4月采集土壤样品,4种茶园随机布5个典型样方,样方间距10 m。每个样方内按梅花采样法选取5个采样点,采集0—20 cm和20—40 cm土层的原状土样,每个茶园重复5次。去除石头、根系等后,将采集的原状土样沿自然结构轻轻用手掰成直径约1 cm的小土块,在通风阴凉处自然风干。部分土样用于测定土壤理化性质由表1可知,另一部分通过湿筛法分离出粒径为>2,2~1,1~0.25,<0.25 mm的团聚体^[13]。

1.3 测定项目及方法

土壤理化性质采用常规方法测定^[14];土壤有机氮测定用Bremner蒸馏法^[15],其中酸解性全氮用凯氏法,酸解铵态氮用氧化镁蒸馏法,酸解铵态氮+氨基糖态

氮用磷酸盐—硼酸盐缓冲液法测定,氨基酸态氮用茚三酮、磷酸盐—硼酸盐缓冲液法测定,氨基糖态氮和酸解未知态氮用差减法测得。土壤脲酶活性采用苯酚次氯酸钠色法测定;蛋白酶采用茚三酮比色法测定^[16]。

表 1 不同茶树品种土壤基本理化性质

Table 1 Basic physicochemical properties of soil under different tea cultivars

项目	0—20 cm				20—40 cm			
	FD	CC	CM	CN	FD	CC	CM	CN
pH	4.13	4.22	4.36	4.25	3.98	4.15	4.25	4.15
有机碳/(g·kg ⁻¹)	28.47	21.14	24.79	23.85	16.84	13.14	16.28	15.01
全氮/(g·kg ⁻¹)	0.90	0.76	0.79	0.87	0.77	0.62	0.68	0.68
全磷/(g·kg ⁻¹)	0.98	0.88	0.94	1.02	0.57	0.53	0.58	0.59
有效磷/(mg·kg ⁻¹)	59.86	59.65	50.33	57.02	10.39	13.17	11.09	9.28
全钾/(g·kg ⁻¹)	10.12	11.21	10.85	10.57	10.48	10.75	11.25	11.49
速效钾/(mg·kg ⁻¹)	277.10	348.70	340.90	381.50	113.20	193.60	191.60	274.40
铵态氮/(mg·kg ⁻¹)	4.08	3.01	1.71	3.27	4.10	2.81	1.70	2.97
硝态氮/(mg·kg ⁻¹)	3.35	2.38	1.63	3.85	3.95	2.18	1.59	4.83
交换性钙/(cmol·kg ⁻¹)	1.88	1.81	1.65	1.64	1.81	1.73	1.63	1.60
交换性镁/(cmol·kg ⁻¹)	0.34	0.33	0.24	0.22	0.31	0.30	0.22	0.19
交换性钠/(cmol·kg ⁻¹)	0.14	0.22	0.15	0.18	0.19	0.21	0.13	0.24

1.4 数据处理与统计分析

通过单因素方差分析不同土层、不同植茶品种土壤氮组分含量及氮转化酶活性分布特征的差异,利用线性回归分析植茶土壤有机氮与氮转化酶的相关关系。数据处理及图表制作采用 Origin 24.0 和 Excel 2016 软件,SPSS(20.0)进行统计分析,LSD 法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 植茶对土壤团聚体有机氮组分的影响

由表 2 可知,不同植茶品种而言,0—20 cm 土层 >2 mm 粒径团聚体酸解性全氮含量表现为福鼎大白>川农黄芽早>川沐 217>川茶 3 号;其他粒径团聚体酸解性全氮含量则表现为福鼎大白和川农黄芽早显著高于其他茶树品种。20—40 cm 土层则表现为福鼎大白酸解性全氮含量显著高于其他茶树品种。

不同粒径团聚体中,酸解性全氮含量总体上表现为随着粒径减小而降低的趋势。其中 0—20 cm 土层 >2 mm 团聚体酸解性全氮含量显著高于 1~0.25 mm、<0.25 mm 粒径。20—40 cm 土层则表现为除川茶 3 号外,各品种酸解性全氮含量在 2~1 mm、1~0.25 mm、<0.25 mm 差异不显著。

由表 3 可知,不同植茶品种而言,0—20 cm 土层 >2 mm 粒径团聚体氨基酸态氮含量表现为福鼎大白>川农黄芽早>川沐 217>川茶 3 号;其他粒径团聚体,福鼎大白和川农黄芽早的氨基酸态氮含量无显著差异,且均显著高于其他茶树品种。20—40 cm 土层则表现为川沐 217 和川农黄芽早氨基酸态氮含量无显

著差异且均显著低于福鼎大白。

表 2 不同植茶品种土壤团聚体酸解性全氮含量

Table 2 Acid-hydrolyzable total nitrogen content of soil aggregates under different tea cultivars

土层/ cm	植茶 品种	土壤酸解性全氮含量/(g·kg ⁻¹)			
		>2 mm	2~1 mm	1~0.25 mm	<0.25 mm
0—20	FD	0.79a ^a	0.70a ^b	0.66a ^{bc}	0.64a ^c
	CC	0.60d ^a	0.53c ^b	0.50c ^b	0.49c ^b
	CM	0.65c ^a	0.61b ^{ab}	0.57b ^{bc}	0.56b ^c
	CN	0.73b ^a	0.70a ^{ab}	0.66a ^b	0.66a ^b
20—40	FD	0.64a ^a	0.60a ^b	0.58a ^b	0.58a ^b
	CC	0.50c ^a	0.47c ^{ab}	0.45c ^{bc}	0.43c ^c
	CM	0.57b ^a	0.50b ^{cb}	0.49b ^b	0.49b ^b
	CN	0.59b ^a	0.53b ^b	0.50b ^{cb}	0.50b ^b

注:不同字母表示不同品种间 $p < 0.05$ 水平存在显著差异;不同上标字母表示不同粒径的团聚体在 $p < 0.05$ 水平上有显著差异,下同。

不同粒径团聚体中,0—20 cm 土层中,1~0.25 mm 和 <0.25 mm 粒径团聚体的氨基酸态氮含量差异不显著,且均显著低于 >2 mm 粒径团聚体。20—40 cm 土层团聚体间氨基酸态氮含量的变化趋势与 0—20 cm 土层相似。

由表 4 可知,不同植茶品种而言,0—20 cm 土层中种植川农黄芽早的土壤中酸解铵态氮的含量在各粒径团聚体间均显著高于川茶 3 号。而 20—40 cm 土层中除 2~1 mm 粒径团聚体外,均表现为种植福鼎大白和川农黄芽早的土壤酸解铵态氮的含量无显著差异且均显著高于其他茶树品种土壤。

不同粒径团聚体中,0—20 cm 土层中,除川农黄

芽早外,其他各品种的土壤酸解铵态氮含量在 >2 mm 粒径团聚体中最高,显著高于其他粒径团聚体。而其

表3 不同植茶品种土壤团聚体氨基酸态氮含量

Table 3 Amino acid nitrogen content of soil aggregates under different tea cultivars

土层/ cm	植茶 品种	土壤氨基酸态氮含量/(g·kg ⁻¹)			
		>2 mm	2~1 mm	1~0.25 mm	<0.25 mm
0—20	FD	0.29a ^a	0.26a ^b	0.25a ^{bc}	0.24a ^c
	CC	0.21d ^a	0.19c ^b	0.18c ^{bc}	0.17c ^c
	CM	0.24c ^a	0.22b ^a	0.20b ^b	0.20b ^b
	CN	0.27b ^a	0.26a ^{ab}	0.24a ^b	0.24a ^b
20—40	FD	0.24a ^a	0.22a ^{ab}	0.21a ^b	0.21a ^b
	CC	0.18c ^a	0.17c ^{ab}	0.16c ^b	0.15c ^b
	CM	0.21b ^a	0.18b ^b	0.17b ^{cb}	0.17b ^b
	CN	0.21b ^a	0.19b ^b	0.18b ^b	0.18b ^b

由表5可知,不同植茶品种而言,0—20 cm 土层中种植川农黄芽早土壤氨基糖态氮含量在各粒径间均显著高于川茶3号。而20—40 cm 土层中,除 <0.25 mm 团聚体外,其他粒径间氨基糖态氮含量均表现为川农黄芽早显著高于川茶3号和川沐217。

不同粒径团聚体中,0—20 cm 土层中 <0.25 mm 团聚体氨基糖态氮含量显著低于其他粒径团聚体,而20—40 cm 土层中 >2 mm 粒径团聚体氨基糖态氮含量显著高于其他粒径团聚体。

由表6可知,不同植茶品种而言,0—20 cm 土层

表5 不同植茶品种土壤团聚体氨基糖态氮含量

Table 5 Amino sugar nitrogen content of soil aggregates under different tea cultivars

土层/ cm	植茶 品种	土壤氨基糖态氮含量/(g·kg ⁻¹)			
		>2 mm	2~1 mm	1~0.25 mm	<0.25 mm
0—20	FD	0.14a ^a	0.09b ^b	0.07c ^c	0.07a ^c
	CC	0.12b ^a	0.08c ^b	0.05d ^c	0.04c ^c
	CM	0.09c ^b	0.10b ^{ab}	0.11b ^a	0.05b ^c
	CN	0.13a ^b	0.16a ^a	0.13a ^b	0.07a ^c
20—40	FD	0.13a ^a	0.05ab ^c	0.05c ^c	0.06a ^b
	CC	0.10b ^a	0.04b ^b	0.05c ^b	0.02c ^c
	CM	0.08b ^a	0.02c ^d	0.07b ^b	0.04b ^c
	CN	0.13a ^a	0.06a ^c	0.09a ^b	0.05b ^d

2.2 植茶对土壤团聚体氮转化酶活的影响

由表7可知,不同植茶品种而言,0—20 cm 土层种植福鼎大白和川农黄芽早的土壤蛋白酶活性无显著差异且均显著高于川茶3号。而20—40 cm 土层各植茶品种土壤蛋白酶活性变化趋势与0—20 cm 土层相似。

不同粒径团聚体中,0—20 cm 土层中土壤蛋白酶活性在各品种间均表现为随着粒径减小而呈增大

他粒径间无显著差异。而20—40 cm 土层中, >2 mm 粒径酸解铵态氮含量显著高于其他粒径团聚体。

表4 不同植茶品种土壤团聚体酸解铵态氮含量

Table 4 Acid-hydrolyzable ammonium nitrogen content of soil aggregates under different tea cultivars

土层/ cm	植茶 品种	土壤酸解铵态氮含量/(g·kg ⁻¹)			
		>2 mm	2~1 mm	1~0.25 mm	<0.25 mm
0—20	FD	0.26a ^a	0.18b ^b	0.18a ^b	0.16b ^b
	CC	0.23b ^a	0.15c ^b	0.13b ^b	0.14b ^b
	CM	0.22b ^a	0.16c ^b	0.17a ^b	0.16b ^b
	CN	0.27a ^a	0.22a ^b	0.16a ^d	0.19a ^c
20—40	FD	0.17a ^a	0.13a ^b	0.15a ^b	0.11a ^c
	CC	0.15b ^a	0.13a ^a	0.09b ^b	0.08b ^b
	CM	0.15b ^a	0.12a ^b	0.11b ^c	0.08b ^d
	CN	0.17a ^a	0.13a ^b	0.13a ^b	0.11a ^c

中,福鼎大白茶的土壤 >1 mm 粒径团聚体酸解未知态氮含量明显高于川茶3号和川农黄芽早。而20—40 cm 土层各植茶品种土壤酸解未知态氮含量变化趋势与0—20 cm 土层相似。

在0—20 cm 土层中,除川沐217外,其他植茶品种的土壤酸解未知态氮含量在2~1 mm,1~0.25 mm 和 <0.25 mm 粒径间无显著差异,且这些粒径的氮含量均显著高于 >2 mm 粒径团聚体。而20—40 cm 土层 <0.25 mm 粒径团聚体酸解未知态氮含量显著高于 >2 mm 粒径团聚体。

表6 不同植茶品种土壤团聚体酸解未知态氮含量

Table 6 Acid-hydrolyzable unknown nitrogen content of soil aggregates under different tea cultivars

土层/ cm	植茶 品种	土壤酸解未知态氮含量/(g·kg ⁻¹)			
		>2 mm	2~1 mm	1~0.25 mm	<0.25 mm
0—20	FD	0.10ab ^b	0.16a ^a	0.17a ^a	0.17a ^a
	CC	0.05c ^b	0.12b ^a	0.14a ^a	0.15a ^a
	CM	0.11a ^{bc}	0.14ab ^{ab}	0.09b ^c	0.15a ^a
	CN	0.06bc ^b	0.07c ^b	0.13ab ^a	0.16a ^a
20—40	FD	0.10ab ^b	0.19a ^a	0.16a ^a	0.19a ^a
	CC	0.07b ^c	0.13b ^b	0.16a ^{ab}	0.18a ^a
	CM	0.13a ^b	0.16ab ^{ab}	0.14ab ^b	0.19a ^a
	CN	0.07b ^b	0.14b ^a	0.10b ^b	0.17a ^a

的趋势,在微团聚体中蛋白酶活性显著低于其他粒径团聚体。20—40 cm 土层中则表现为 >2 mm 粒径团聚体蛋白酶活性显著低于其他粒径团聚体,且其他粒径团聚体蛋白酶活性无显著差异。

由图1可知,不同植茶品种而言,0—20 cm 土层种植福鼎大白的土壤脲酶活性显著高于川茶3号;川沐217的土壤脲酶活性与川农黄芽早相比无显著差

异。而 20—40 cm 土层脲酶活性变化趋势与 0—20 cm 土层相似。

不同粒径团聚体中,0—20 cm 土层中土壤脲酶活性在各品种间均表现为随着粒径减小而呈增大的趋势,且 1~0.25 mm 粒径团聚体与 <0.25 mm 粒径团聚体脲酶活性无显著差异。20—40 cm 土层脲酶活性与 0—20 cm 土层相似。

2.3 植茶土壤有机氮与氮转化酶的关系

由图 2 可知,土壤脲酶与酸解性全氮和氨基酸态氮呈极显著正相关关系($p < 0.01$),与酸解未知态氮呈显著正相关关系($p < 0.05$);而土壤脲酶与酸解铵态氮和氨基糖态氮无显著正相关关系。土壤蛋白酶与土壤有机氮中的酸解未知态氮呈极显著正相关关系($p < 0.01$),而与其他有机氮间并未达显著相关。

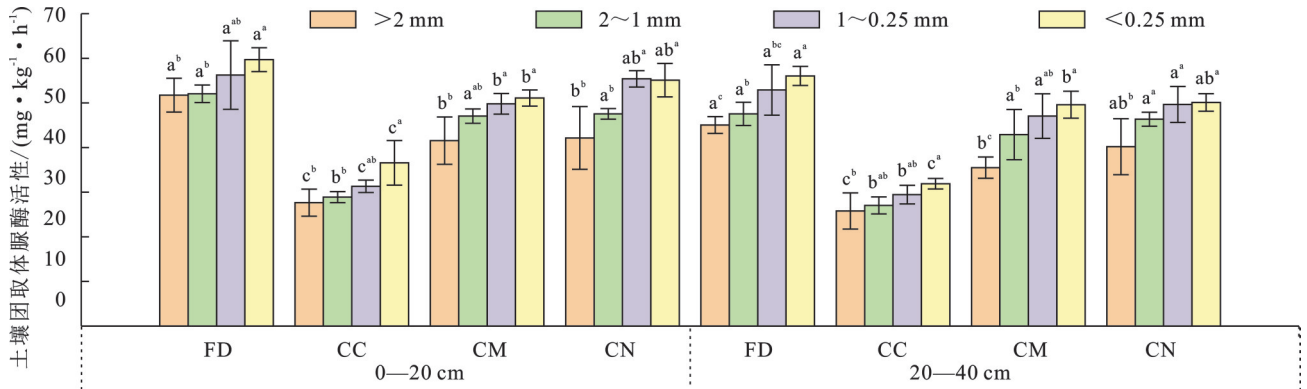


图 1 不同植茶品种土壤团聚体脲酶活性

Fig. 1 Urease activity of soil aggregates under different tea cultivars

3 讨论

3.1 不同植茶品种土壤对有机氮分布的影响

种植福鼎大白和川农黄芽早的土壤中,水稳性团聚体酸解铵态氮含量相对较高。这可能是由于酸解铵态氮部分是来自土壤中无机交换性铵和部分固定态铵^[17]。由表 1 可知,本研究中种植福鼎大白和川农黄芽早土壤中铵态氮的含量显著高于其他品种,故种植福鼎大白和川农黄芽早土壤酸解铵态氮的含量显著高于其他品种。本研究中种植福鼎大白和川农黄芽早土壤团聚体氨基酸态氮高于其他茶树品种,这主要是由于不同植茶品种凋落物质量差异所致,已有研究表明,凋落物中碳氮比(C/N)较低的茶树品种可加速有机氮的矿化过程,同时为微生物提供更多易分解底物,促进氨基酸态氮和酸解铵态氮的积累^[18]。根据课题组研究可知^[19],不同植茶品种凋落物质量与本研究结果相似。种植福鼎大白和川农黄芽早土壤团聚体中氨基糖态氮含量高于其他品种,可能是由于福鼎大白和川农黄芽早为小乔木型,叶椭圆形且叶缘略向上,相对其他茶树品种,更有利于进行光合作用,形成良好的通风和通气的微

表 7 不同植茶品种土壤团聚体蛋白酶活性
Table 7 Protease activity of soil aggregates under different tea cultivars

土层/ cm	植茶 品种	土壤蛋白酶活性/(mg · kg ⁻¹ · h ⁻¹)			
		>2 mm	2~1 mm	1~0.25 mm	<0.25 mm
0—20	FD	50.45a ^c	59.63ab ^b	66.78a ^{ab}	72.20a ^a
	CC	38.08b ^c	48.37c ^b	54.17b ^{ab}	56.88b ^a
	CM	46.87a ^c	53.63bc ^{bc}	56.73b ^{ab}	62.49b ^a
	CN	52.32a ^c	63.86a ^b	71.53a ^{ab}	75.87a ^a
20—40	FD	45.41a ^b	54.31ab ^a	54.77a ^a	57.76ab ^a
	CC	34.27b ^b	45.95c ^a	48.75b ^a	51.19c ^a
	CM	42.18a ^b	50.95bc ^a	54.06ab ^a	54.24bc ^a
	CN	47.09a ^b	58.67a ^a	59.38a ^a	60.70a ^a

生物生境,有利于土壤相关微动物的生存和繁衍,从而提高土壤氨基糖态氮含量。相比之下,川茶 3 号(灌木型,冠幅 85 cm)和川沐 217(半乔木型,冠幅 100 cm)的凋落物量或质量可能较低,导致微生物活性受限,有机氮组分积累不足。酸解未知态氮主要由还未能鉴别的含氮化合物以及难矿化的氮组分为主^[20],因而其在品种间变化无明显规律性。种植福鼎大白和川农黄芽早土壤氮转化酶(脲酶、蛋白酶)活性处于较高水平,这可能与根系分泌物中酶促底物的差异有关。福鼎大白和川农黄芽早的根系可能分泌更多含氮有机物(如多肽、尿素),直接刺激脲酶和蛋白酶的合成。说明研究区种植这两种茶树品种土壤氮素转化能力较强,可为茶树释放更多氮素养分促进生长。

3.2 不同粒径土壤团聚体对有机氮分布的影响

本研究中土壤酸解性全氮主要分布于 >2 mm 粒径团聚体,这与张永全等^[21]研究结果较一致;研究发现,表明团聚体中酸解性全氮和有机碳具有协同性,减少人为扰动有助于保护团聚体结构,降低外界因素对其的破坏,进而增强团聚体对有机碳的封存能

力,减缓微生物对植物的分解速率,提高团聚体中有
机碳和酸解性全氮含量。氨基酸态氮是土壤可矿化

有机氮的中重要组成部分,其含量通常作为评价土
壤潜在供氮能力的重要指标。

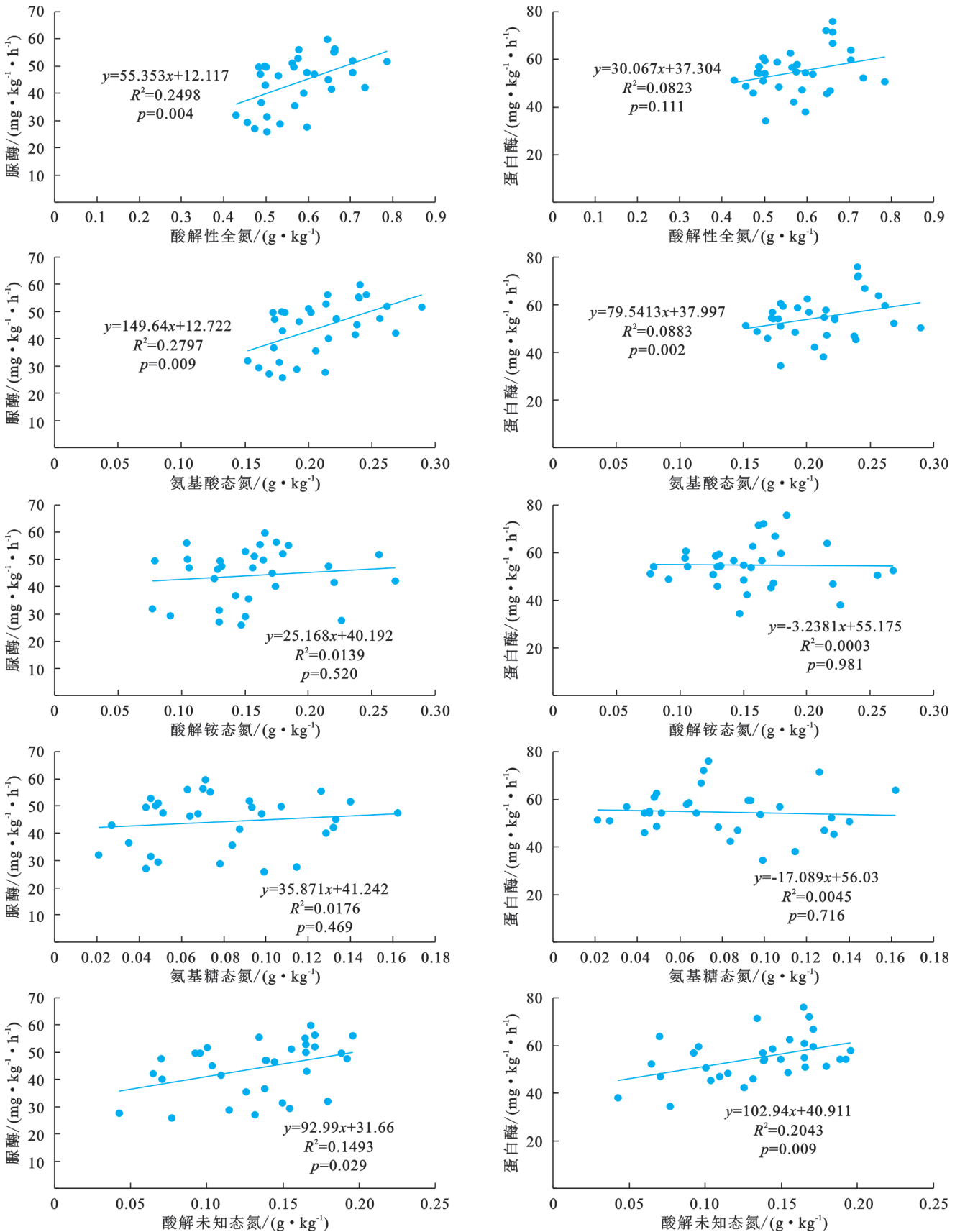


图 2 植茶土壤氮转化酶与有机态氮的线性回归分析

Fig. 2 Linear regression analysis of nitrogen transformation enzymes and organic nitrogen in tea plantation soils

>2 mm 粒径是土壤氨基酸态氮的主要储存场所,这主要是由于氨基酸态氮是蛋白质分解的产物,有助于促进>2 mm 粒径团聚体的形成^[22],这也是造成氨基酸态氮易在大粒径团聚体中富集的原因。本研究中土壤氨基糖态氮集中在>2 mm 粒径团聚体中,这归因于多糖诱导的团聚作用,在此过程中,氨基糖态氮发挥着将黏粒胶结成大粒径团聚体的关键作用^[23]。在 20—40 cm 土层的 1~0.25 mm 粒径团聚体中,川茶 3 号与川沐 217 的酸解铵态氮含量差异不显著,这可能是由于川茶 3 号为灌木型(根系较浅),而川沐 217 为半乔木型(根系较深),两者在深层土壤中的根系分泌物可能减少,导致铵态氮积累差异不显著。土壤酸解未知态氮主要集中在微团聚体中,且在各植茶品种间无显著差异,这可能主要是由于微团聚体中酸解未知态氮较稳定,不易受植茶品种的影响。土壤氮转化酶活性也主要集中在微团聚体中,一方面由于土壤易被小粒径团聚体中有机无机复合体所吸附,从而受到物理保护;另一方面蛋白酶和脲酶主要由细菌分泌产生,且小粒径团聚体中的细菌群落具有较高的丰富度和多样性,从而有助于土壤酶在小粒径团聚体中积累^[24]。其中在 20—40 cm 土层的 2—1 mm 粒径团聚体中,川沐 217 与川农黄芽早的蛋白酶活性差异不显著,可能是由于两者均为半乔木型,根系分布深度相似,分泌类似的多肽类物质作为蛋白酶底物,进而刺激酶活性趋同^[25]。

3.3 氮转化酶对土壤有机氮分布的影响

土壤有机氮的转化主要是由土壤酶所介导生物化学过程,但土壤氮转化酶对土壤有机态氮的影响及其转化能力存在差异^[26]。本研究中种植不同品种茶树有效调节土壤氮素转化过程,使土壤氮素转化过程具有差异性进而影响茶树吸收。土壤脲酶与酸解性全氮、氨基酸态氮存在显著的正相关关系,这主要是因为脲酶在土壤有机氮矿化过程中扮演着关键的水解酶角色。例如,在水稻土壤中,随着施氮量的增加,土壤碱解氮含量增加,而脲酶活性也表现出与氮素水平的正相关性^[27]。此外,在若尔盖湿地的研究中,土壤脲酶活性与土壤退化程度相关,表明脲酶活性可以作为土壤氮素状况和土壤健康的一个指标^[28]。脲酶与酸解未知态氮呈显著正相关关系,由于酸解未知态氮中固定态铵含量占比较大,进而促进脲酶水解更多茶树所需的氮素养分^[29]。土壤酸解未知态氮含量与蛋白酶活性、脲酶活性均呈极显著正相关关系,其原因可能是由于植茶土壤良好的水热条件为氮转化相关微生物提供良好的栖息环境,从而影响氮转化酶活性,调控土壤氮素的氨化和矿

化过程^[25]。此外,良好的微生物生境提高茶树根际固氮微生物的活性,固氮能力增强,从而提高茶园土壤有机氮含量^[24]。茶园每年施加尿素,提高脲酶活性,尿素的主要成分是碳酰胺,相较于土壤中高分子量有机氮更易被微生物吸收利用,使其更多地水解为矿质氮,从而促进土壤有机氮的积累^[29]。可见,植茶土壤各有机氮组分对土壤氮转化酶均具有一定影响,进而影响土壤中有机氮的转化过程,以及土壤氮转化酶在氮素转化过程的贡献。因此,在植茶过程中,建议合理施加氮肥,将更有利于提高茶园土壤氮循环,进而提高茶树对氮素的吸收转化。

4 结论

(1) 不同植茶品种土壤酸解未知态氮主要集中在小粒径团聚体中,而酸解性全氮、氨基酸态氮、酸解铵态氮、氨基糖态氮变化趋势则相反。除酸解未知态氮外,其他各有机氮在品种间变化表现为福鼎大白和川农黄芽早高于其他品种,种植福鼎大白和川农黄芽早茶树品种,可显著提升土壤供给矿质氮的潜力,进而促进茶树的茁壮成长。

(2) 在小粒径团聚体中,不同植茶品种的土壤脲酶与蛋白酶活性表现较高。此外,相较于其他品种,川茶 3 号的这两种酶活性较低,意味着种植其他茶树品种能增强土壤氮素转化能力,减少茶树生长对氮素营养的依赖。

(3) 不同植茶品种土壤团聚体氮转化酶活对有机氮各组分的影响程度不同,其中土壤脲酶与酸解性全氮和氨基酸态氮和酸解未知态氮呈极显著或显著正相关关系。而土壤蛋白酶与土壤酸解未知态氮呈极显著正相关关系,说明土壤氮转化酶对有机氮转化具有重要的影响,调控茶园土壤氮素周转循环。

参考文献(References):

- [1] Li H, Liu H, Wang Y, et al. Cytosolic ascorbate peroxidase 1 modulates ascorbic acid metabolism through cooperating with nitrogen regulatory protein P- II in tea plant under nitrogen deficiency stress[J]. *Genomics*, 2020, 112(5): 3497-3503.
- [2] 于淑华,张丽霞,谢雪迎,等.不同水分模式对山东茶园土壤氮素动态的影响[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(4): 289-298.
Yu S H, Zhang L X, Xie X Y, et al. Effects of water regimes on soil nitrogen dynamics in tea garden in Shandong Province[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(4): 289-298.
- [3] Machado P V F, Farrell R E, Deen W, et al. Contribution of crop residue, soil, and fertilizer nitrogen to nitrous

- oxide emissions varies with long-term crop rotation and tillage[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 767: 145107.
- [4] 梁坤,樊玉清, Kudakwashe Meki, 等. 黄河口湿地典型盐碱植被群落土壤氮素的季节动态及根际效应[J]. *环境化学*, 2019, 38(10): 2327-2335.
Liang K, Fan Y Q, Meki K, et al. The seasonal dynamics of nitrogen and rhizosphere effects in the typical saline-alkali vegetation communities of the Yellow River Estuary wetland [J]. *Environmental Chemistry*, 2019, 38(10): 2327-2335.
- [5] 章梦,王晨颖,罗松,等. 施用氮肥对农田土壤有机氮组分的影响整合分析[J]. *生态学报*, 2025, 45(3): 1328-1338.
Zhang M, Wang C Y, Luo S, et al. Influences of nitrogen fertilization on soil organic nitrogen components in agroecosystems: a meta-analysis [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(3): 1328-1338.
- [6] 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.
Dang Y A, Wang G D, Li S Q. The changing characteristics of profile distribution of soil organic nitrogen component of the typical soil types on the Loess Plateau[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(24): 5021-5030.
- [7] 田平雅,沈聪,赵辉,等. 银北盐碱区植物根际土壤酶活性及微生物群落特征[J]. *土壤学报*, 2020, 57(1): 217-226.
Tian P Y, Shen C, Zhao H, et al. Enzyme activities and microbial communities in rhizospheres of plants in salinized soil in north Yinchuan, China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(1): 217-226.
- [8] Li W T, Liu M, Jiang C Y, et al. Changes in soil aggregate-associated enzyme activities and nutrients under long-term chemical fertilizer applications in a phosphorus-limited paddy soil[J]. *Soil Use and Management*, 2017, 33(1): 25-33.
- [9] 杜臻杰,樊向阳,吴海卿,等. 施用生物质炭和猪场沼液对潮土团聚体及氮素形态影响研究[J]. *灌溉排水学报*, 2015, 34(9): 20-23, 27.
Du Z J, Fan X Y, Wu H Q, et al. Effect of biochar and piggery biogas slurry on distribution of nitrogen pools and aquatic soil aggregates[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2015, 34(9): 20-23, 27.
- [10] 崔琳. 典型黑土区土壤团聚体中氮素的分布特征[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2014.
Cui L. Distribution characteristics of nitrogen fractions in soil aggregates in black soil region [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2014.
- [11] 胡宁,马志敏,蓝家程,等. 石漠化山地植被恢复过程土壤团聚体氮分布及与氮素矿化关系研究[J]. *环境科学*, 2015, 36(9): 3411-3421.
Hu N, Ma Z M, Lan J C, et al. Nitrogen fraction distributions and impacts on soil nitrogen mineralization in different vegetation restorations of karst rocky desertification [J]. *Environmental Science*, 2015, 36(9): 3411-3421.
- [12] Liu Y R, Li X, Shen Q R, et al. Enzyme activity in water-stable soil aggregates as affected by long-term application of organic manure and chemical fertiliser[J]. *Pedosphere*, 2013, 23(1): 111-119.
- [13] Gartzia-Bengoetxea N, González-Arias A, Merino A, et al. Soil organic matter in soil physical fractions in adjacent semi-natural and cultivated stands in temperate Atlantic forests [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(8): 1674-1683.
- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000.
Lu R K. Methods of soil agrochemical analysis [M]. China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [15] Bremner J M. Organic forms of nitrogen[M]//Methods of Soil Analysis. Madison, WI, USA: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 2016: 1238-1255.
- [16] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
Guan S Y. Soil enzyme and its research method [M]. Beijing: Agriculture Press, 1986.
- [17] 吴汉卿,杜世宇,王丹阳,等. 设施土壤有机氮组分及番茄产量对水氮调控的响应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(5): 805-813.
Wu H Q, Du S Y, Wang D Y, et al. Response of soil organic nitrogen fractions and tomato yield to irrigation and nitrogen fertilization in greenhouse [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(5): 805-813.
- [18] 李子密,于红梅,束良佐. 不同植茶年限土壤有机氮组分的变化[J]. *浙江师范大学学报: 自然科学版*, 2019, 42(2): 222-227.
Li Z M, Yu H M, Shu L Z. Study on changes of soil organic nitrogen fractions of tea planting with different years[J]. *Journal of Zhejiang Normal University: Natural Sciences*, 2019, 42(2): 222-227.
- [19] 杨佳,郑子成,李廷轩. 不同植茶品种土壤团聚体及其全铝和交换态铝的分布特征[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(3): 583-589.
Yang J, Zheng Z C, Li T X. Distribution of total and exchangeable aluminum in soil aggregates with different tea cultivars[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(3): 583-589.
- [20] 张雨恒. 森林草原交错带三种植被类型土壤可溶性有机氮组分特征及其对矿化的调控[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2019.
Zhang Y H. Characteristics of soil soluble organic nitrogen components and their regulation on mineralization in three vegetation types in the interforest zone of forest and grassland [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2019.

- [21] 张永全,寇长林,马政华,等.长期有机肥与氮肥配施对潮土有机碳和有机氮组分的影响[J].土壤通报,2015,46(3):584-589.
Zhang Y Q, Kou C L, Ma Z H, et al. Effects of long term combination application of organic manure and nitrogen fertilizer on organic carbon and organic nitrogen forms of fluvo-aquic soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2015,46(3):584-589.
- [22] 丛耀辉,张玉玲,张玉龙,等.黑土区水稻土有机氮组分及其对可矿化氮的贡献[J].土壤学报,2016,53(2):457-467.
Cong Y H, Zhang Y L, Zhang Y L, et al. Soil organic nitrogen components and their contributions to mineralizable nitrogen in paddy soil of the black soil region[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016,53(2):457-467.
- [23] Nguyen T H, Shindo H. Effects of different levels of compost application on amounts and distribution of organic nitrogen forms in soil particle size fractions subjected mainly to double cropping[J]. Agricultural Sciences, 2011,2(3):213-219.
- [24] 李鑫,马瑞萍,安韶山,等.黄土高原不同植被带土壤团聚体有机碳和酶活性的粒径分布特征[J].应用生态学报,2015,26(8):2282-2290.
Li X, Ma R P, An S S, et al. Characteristics of soil organic carbon and enzyme activities in soil aggregates under different vegetation zones on the Loess Plateau[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015,26(8):2282-2290.
- [25] 韩晓阳,张丽霞,黄晓琴,等.氮素转化菌对茶树根际土壤微生物群落和养分含量的影响[J].茶叶科学,2015,35(5):405-414.
Han X Y, Zhang L X, Huang X Q, et al. Effect of nitrogen transformation bacteria on microbial community and nutrient contents in rhizosphere soil of tea plant[J]. Journal of Tea Science, 2015,35(5):405-414.
- [26] 林玉,聂富育,杨万勤,等.四川盆地西缘4种人工林土壤氮转化酶的季节动态[J].应用与环境生物学报,2019,25(3):634-639.
Lin Y, Nie F Y, Yang W Q, et al. Seasonal dynamics of soil nitrogen transformation enzymes at four plantations in the western edge of Sichuan basin[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2019,25(3):634-639.
- [27] 宋玉婷,吕小红,陈温福.水稻土壤碱解氮与脲酶活性对不同氮素水平的响应[J].北方水稻,2010,40(4):8-12.
Song Y T, Lv X H, Chen W F. Response of alkali-hydrolyzable nitrogen and urease activity of paddy soil to different nitrogen levels[J]. North Rice, 2010,40(4):8-12.
- [28] 吴俐莎,唐杰,罗强,等.若尔盖湿地土壤酶活性和理化性质与微生物关系的研究[J].土壤通报,2012,43(1):52-59.
Wu L S, Tang J, Luo Q, et al. Study on the relationship between soil enzyme activities and soil physico-chemical properties with microorganism of degraded soil from zoige wetland[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2012,43(1):52-59.
- [29] 焦亚鹏,齐鹏,王晓娇,等.施氮量对农田土壤有机氮组分及酶活性的影响[J].中国农业科学,2020,53(12):2423-2434.
Jiao Y P, Qi P, Wang X J, et al. Effects of different nitrogen application rates on soil organic nitrogen components and enzyme activities in farmland[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020,53(12):2423-2434.

(上接第135页)

- [21] 何红艳,郭志华,肖文发.降水空间插值技术的研究进展[J].生态学杂志,2005,24(10):1187-1191.
He H Y, Guo Z H, Xiao W F. Review on spatial interpolation techniques of rainfall[J]. Chinese Journal of Ecology, 2005,24(10):1187-1191.
- [22] 刘晓林,史燕东,曾小磊,等.基于CSLE模型的南、北盘江流域水土流失定量分析评价[J].人民珠江,2024,45(2):69-75,96.
Liu X L, Shi Y D, Zeng X L, et al. Quantitative assessment of soil and water loss in the nanpan and Beipan River Basins based on CSLE model[J]. Pearl River, 2024,45(2):69-75,96.
- [23] 张宇宁,吕刚,张泰瑜,等.暴雨作用下排土场边坡水土保持工程措施的减流减沙效益[J].煤炭学报,2025,50(5):2622-2634.
Zhang Y N, Lyu G, Zhang T Y, et al. Research on sediment reduction benefits of engineering measures on waste rock slope under different rainfall intensities[J]. Journal of China Coal Society, 2025,50(5):2622-2634.
- [24] 赵妍,周珊珊,高云飞,等.特大暴雨下残垣丘陵沟壑区水土流失与梯田措施效益评价[J].水土保持通报,2024,44(5):92-99.
Zhao Y, Zhou S S, Gao Y F, et al. Benefits evaluation of soil and water loss and terrace measures in hilly and gully areas of torrential rainfall[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024,44(5):92-99.
- [25] 吴淑芳,张彪,石学瑾,等.FLUS-CSLE模型预测黄土高原典型流域不同土地利用变化情景土壤侵蚀[J].农业工程学报,2022,38(24):83-92.
Wu S F, Zhang B, Shi X J, et al. Prediction of soil erosion under different land uses in the typical watershed of the Loess Plateau based on FLUS-CSLE model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022,38(24):83-92.