

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2024.02.004

秦子元, 张忠学, 郑和祥, 等. 水氮管理对黑土稻作土壤碳氮磷化学计量特征的影响. 土壤, 2024, 56(2): 264–272.

# 水氮管理对黑土稻作土壤碳氮磷化学计量特征的影响<sup>①</sup>

秦子元<sup>1</sup>, 张忠学<sup>2</sup>, 郑和祥<sup>1</sup>, 畅利毛<sup>3</sup>, 韩再慧<sup>4</sup>, 杜思澄<sup>2</sup>

(1 中国水利水电科学研究院内蒙古阴山北麓草原生态水文国家野外科学观测研究站, 呼和浩特 010020; 2 东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030; 3 内蒙古自治区地质调查研究院, 呼和浩特 010018; 4 杭锦旗水利局, 内蒙古鄂尔多斯 017000)

**摘要:** 为阐明不同水氮管理模式对黑土稻作产量和土壤碳氮磷化学计量特征的影响, 设置 3 种灌溉模式(常规淹灌、浅湿灌溉、控制灌溉)和 4 个氮肥梯度(0、85、110、135 kg/hm<sup>2</sup>), 探究了水稻产量、土壤碳氮磷含量及其化学计量比和层化率对不同水氮管理模式的响应规律。结果表明: 与常规淹灌和浅湿灌溉相比, 控制灌溉模式下, 水稻通过形成足量大穗提高库容, 小幅增加结实率, 从而显著提高产量( $P<0.05$ )。稻田土壤有机碳(SOC)、全氮(STN)、全磷(STP)含量随土层深度增加而降低, 施氮处理可显著提升 SOC、STN 含量并降低 STP 含量( $P<0.05$ )。与浅湿灌溉和控制灌溉相比, 常规淹灌模式增加 SOC、STN 含量, 而与常规淹灌和浅湿灌溉相比, 控制灌溉模式增加 STP 含量。土壤 C/N 随施氮量增加而降低, 土壤 C/P、N/P 随施氮量增加而升高, 施氮能提升不同土层平均 C/N 层化率, 降低 C/P、N/P 层化率。相比常规淹灌, 控制灌溉模式能提升不同土层 SOC、STP 含量层化率, 在一定程度上说明控制灌溉模式下配施适宜氮肥可以改善土壤质量。综合考虑, 本研究中控制灌溉模式配施 110 kg/hm<sup>2</sup> 氮肥为最优水氮管理方式。

**关键词:** 水稻; 黑土区; 水氮管理; 土壤; 碳氮磷; 化学计量比

中图分类号: S511; S143 文献标志码: A

## Effects of Water and Nitrogen Management on Stoichiometric Characteristics of Soil Carbon, Nitrogen and Phosphorus in Rice Farming Area of Black Soil

QIN Ziyuan<sup>1</sup>, ZHANG Zhongxue<sup>2</sup>, ZHENG Hexiang<sup>1</sup>, CHANG Limao<sup>3</sup>, HAN Zaihui<sup>4</sup>, DU Sicheng<sup>2</sup>

(1 Yinshanbeilu Grassland Eco-hydrology National Observation and Research Station, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Hohhot 010020, China; 2 School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 3 Inner Mongolia Geological Environment Monitoring Institute, Hohhot 010018, China; 4 Hangjin Banner Water Conservancy Bureau, Ordos, Inner Mongolia 017000, China)

**Abstract:** In order to elucidate the effects of different water and nitrogen management modes on rice yield and soil carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry characteristics in black soil, an field experiment was conducted, in which, 3 irrigation modes (F, conventional flooding irrigation; S, shallow wet irrigation; C, controlled irrigation) and 4 nitrogen application gradients (N0, 0; N1, 85 kg/hm<sup>2</sup>; N2, 110 kg/hm<sup>2</sup>; N3, 135 kg/hm<sup>2</sup>) were set up, and then rice yields, the contents of soil carbon, nitrogen and phosphorus, stoichiometric ratios and stratification rates were determined under different treatments. The results showed that, compared with F and S, rice yield under C was significantly increased through the formation of sufficient large panicles to increase storage capacity and slightly increase seed setting rate ( $P<0.05$ ). The contents of soil organic carbon (SOC), total nitrogen (STN), and total phosphorus (STP) decreased with the increase of soil depth. Nitrogen application treatments significantly increased SOC and STN contents but decreased STP content ( $P<0.05$ ). Compared with S and C, SOC and STN contents were increased under F. Compared with F and S, STP content was increased under C. Soil C/N decreased but soil C/P and N/P increased with the increase of nitrogen application rate. Nitrogen application improved the average C/N stratification rates but reduced the C/P and N/P stratification rates of different soil layers, and compared with F, C improved the stratification rates of SOC and STP contents in different soil layers. In conclusion, C with appropriate nitrogen fertilizer can improve soil quality, and C with 110 kg/hm<sup>2</sup> nitrogen fertilizer is considered as the optimal water and nitrogen management method.

**Key words:** Rice; Black soil area; Water and nitrogen management; Soil; Carbon, nitrogen and phosphorus; Stoichiometric ratio

①基金项目: 内蒙古自治区科技计划项目(2023YFDZ0075)和国家自然科学基金面上项目(52079028, 51779046) 资助。

作者简介: 秦子元(1995—), 男, 内蒙古呼和浩特人, 博士, 工程师, 主要从事农业节水理论与技术研究。E-mail: 598760724@qq.com

水稻作为我国重要粮食作物,现阶段单位面积产量增幅趋缓,而我国对稻米的需求量却逐年增加<sup>[1-2]</sup>。近年来,土壤肥力下降、土壤盐碱化、土壤污染等耕地质量问题日益凸显,已成为威胁我国粮食生产安全的主要因素<sup>[3]</sup>。在此背景下,为保障稻田生态系统的可持续发展,深入探究土壤碳氮磷养分与水稻产量间的互馈关系,对于阐明稻田生态系统初级生产、有机质积累和分解的作用机制意义重大<sup>[4]</sup>。此外,土壤碳氮磷通常与作物产量呈正相关<sup>[5]</sup>,碳氮磷生态过程紧密相连,其含量变化会使生态系统各组分化学计量特征发生改变,进而影响生态系统的结构和功能<sup>[6-7]</sup>。因此,在保证作物产量的基础上,通过土壤碳氮磷化学计量特征解析土壤养分限制情况,对于明确土壤养分现状、揭示不同调控因素与碳氮磷的耦合机理、阐明稻田生态系统养分循环与平衡具有重要意义。

稻田生态系统土壤碳氮磷受自然因素和人为因素共同影响,灌溉施肥通过改变植物群落的输入输出过程,使土壤碳氮磷循环过程发生变化,从而影响土壤养分<sup>[8]</sup>。目前,国内外专家学者对于土壤碳氮磷化学计量特征的研究多集中在林地、草地、山地和湿地等自然生态系统,影响因素主要包括土层深度、海拔、纬度和演替梯度等,而对稻田土壤碳氮磷化学计量特征的研究相对较少<sup>[9-11]</sup>。与自然生态系统的成土过程不同,稻田经频繁淹水植稻和人工培育形成水稻土,特殊的氧化还原驱动过程,使得稻田土壤碳氮磷化学计量特征更为复杂。我国稻田约占农田的 25%,与旱地相比,水稻土淹水条件下往往会促进土壤碳氮固存,施肥通常会增加稻田土壤磷含量<sup>[12-13]</sup>。Zheng 等<sup>[14]</sup>对林地、旱地、水田不同区域尺度土壤化学计量特征的研究表明,长期旱地利用下土壤碳含量降低,磷含量增加,而水田能提升土壤碳氮磷含量,但会降低土壤碳氮比(C/N)和碳磷比(C/P)。杜映妮等<sup>[15]</sup>研究表

明,长期施肥显著增加紫色土坡耕地土壤碳氮磷钾含量,并显著影响碳氮磷化学计量比及其耦合关系。此外,灌溉与施肥对稻田生态系统养分循环影响较大,适宜灌溉施肥条件通过提升大田环境条件,显著影响作物养分利用进而提升水稻产量<sup>[16]</sup>。尽管如此,不同灌溉施肥条件下的水稻产量与土壤碳氮磷养分维持或协同提升机制仍不清晰,且适宜灌溉与施肥条件下水稻产量提升是否过度消耗土壤养分还需探讨。

针对水稻节水灌溉模式促进植株养分吸收是否会导致土壤养分含量下降的问题,本研究通过大田试验探究不同水氮管理下黑土稻作产量与土壤碳氮磷化学计量间的相互关系,解析土壤氮磷限制格局,以为建立黑土稻作区水资源高效利用、节肥增产及养分协同提升的水氮管理模式提供支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验于 2020—2021 年 5—9 月在黑龙江绥化市庆安灌溉试验站(46°58'8" N, 127°40'2" E)进行。该区属温带大陆性季风气候,年均气温 1.69 °C,年均降水量 577 mm。供试土壤为黑土型水稻土,2020 年和 2021 年 0~20 cm 土层土壤基本理化性质分别为:pH 6.47 和 6.63,有机质 43.1 和 41.9 g/kg,全氮 1.69 和 1.61 g/kg,全磷 0.67 和 0.71,全钾 19.99 和 24.6 g/kg,碱解氮 159.21 和 137.21 mg/kg,有效磷 27.56 和 22.33 mg/kg,速效钾 158.3 和 161.5 mg/kg。

### 1.2 试验设计

试验设置常规淹灌(F)、浅湿灌溉(S)和控制灌溉(C)3 种灌溉模式,生育期水分管理如表 1 所示,在此基础上,设置 N0(0 kg/hm<sup>2</sup>)、N1(85 kg/hm<sup>2</sup>)、N2(110 kg/hm<sup>2</sup>)、N3(135 kg/hm<sup>2</sup>)4 个施氮量(以纯氮计)水平,共 12 个处理,每个处理 3 次重复,共计

表 1 不同灌溉模式水分管理(mm)  
Table 1 Water management under different irrigation modes

灌溉模式	控制指标	返青期	分蘖初期	分蘖中期	分蘖末期	拔节孕穗期	抽穗开花期	乳熟期	成熟期
常规淹灌(F)	灌水上下限	0~30	30~50	30~50	晒田	30~50	30~50	30~50	落干
	蓄水上限	50	100	100		100	100	100	
浅湿灌溉(S)	灌水上下限	0~30	0~30	0~30	晒田	0~30	0~30	0~30	落干
	蓄水上限	50	50	50		50	50	50	
控制灌溉(C)	灌水上下限	0~30	0.85 $\theta_s$ ~ $\theta_s$	0.85 $\theta_s$ ~ $\theta_s$	晒田	0.85 $\theta_s$ ~ $\theta_s$	0.85 $\theta_s$ ~ $\theta_s$	0.70 $\theta_s$ ~ $\theta_s$	落干
	蓄水上限	50	50	50		50	50	20	

注:  $\theta_s$  为 0~20 cm 土层土壤饱和含水量。

36 个试验小区。供试水稻品种为绥粳 18。供试氮肥为尿素(含 N 460 g/kg), 分基肥(45%)、蘖肥(20%)和穗肥(35%)施用; 磷肥为过磷酸钙(含  $P_2O_5$  120 g/kg),  $P_2O_5$  施入量为  $45 \text{ kg/hm}^2$ , 全部作为基肥施入; 钾肥为硫酸钾(含  $K_2O$  600 g/kg),  $K_2O$  施入量为  $80 \text{ kg/hm}^2$ , 按基肥(50%)和 8.5 叶龄肥(50%)

分施。2020 年常规淹灌、浅湿灌溉和控制灌模式的灌溉水量分别为 522、404、323 mm, 2021 年分别为 587、434、346 mm。

### 1.3 测定项目与方法

**1.3.1 气象资料收集** 气温、降雨由气象站记录(图 1、图 2)。

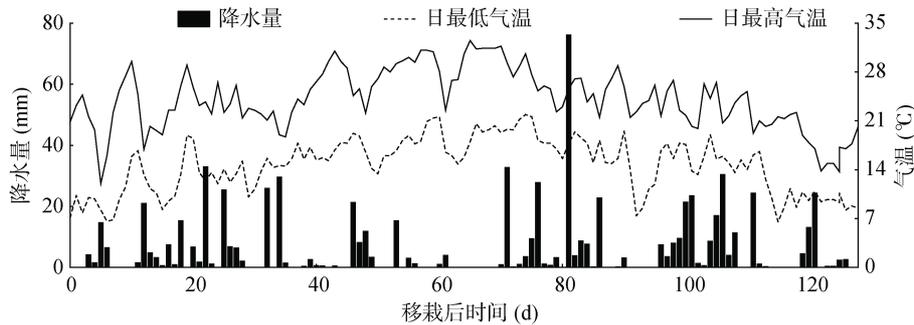


图 1 2020 年水稻生长期气温和降水量日变化

Fig. 1 Daily variation of air temperature and precipitation during rice growing season in 2020

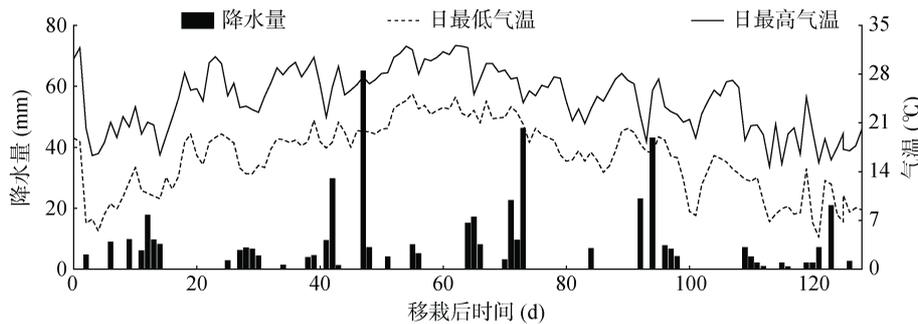


图 2 2021 年水稻生长期气温和降水量日变化

Fig. 2 Daily variation of air temperature and precipitation during rice growing season in 2021

**1.3.2 土壤碳氮磷含量测定** 定位试验开始于 2017 年, 在 2020 年和 2021 年水稻收获后采集 0~20、20~40、40~60 cm 土层土壤样品。每个试验小区同一土层土壤样品用五点法取样, 样品混合均匀后装入自封袋备用, 共收集 36 个土壤样品。采样后去除可见砾石、植物残留物等, 并将土壤置于阴凉处风干, 研磨, 通过 100 目网筛后装入自封袋保存。土壤全氮(STN)用  $H_2SO_4$ -混合催化剂(硫酸钾-硫酸铜-硒)法消解, 土壤全磷(STP)用  $H_2SO_4$ - $HClO_4$  法消解, 消解液过滤后, 装入 50 mL 塑料瓶中待测。STN 和 STP 采用连续流动分析仪(AutoAnalyzer-3 型, 德国 Bran+Luebbe 公司)测定。土壤有机碳(SOC)用总有机碳分析仪(Elementar vario TOC, 德国)测定。

**1.3.3 产量测定与考种** 各小区选取  $1 \text{ m}^2$  水稻收割, 晾晒至含水率约 14% 时测产。各处理随机选取 3 穴植株进行考种, 考察的产量相关性状包括单位面积有效穗数、每穗粒数、千粒重、结实率。

### 1.4 数据处理与分析

不同土层土壤碳氮磷化学计量比均采用质量比, 土壤碳氮磷层化率通过 0~20 cm 土层 STN、STP、SOC 含量或 C/N、C/P、N/P 与大于 20 cm 土层 STN、STP、SOC 含量或 C/N、C/P、N/P 之比计算得出。利用 SPSS 22.0 进行单因素方差分析和多变量双因素方差分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 水氮管理对水稻产量及其构成因素的影响

不同水氮管理模式下, 水稻产量及其构成因素见表 2、表 3。与常规淹灌和浅湿灌溉相比, 控制灌溉显著提升水稻产量( $P<0.05$ ), CN2 处理水稻产量最高, 2 年平均为  $10\ 192.17 \text{ kg/hm}^2$ 。施氮显著提升水稻产量( $P<0.05$ ), 控制灌溉较常规淹灌水稻产量提升 12.42%。施氮量与水稻单位面积有效穗数呈正相关, 与千粒重和结实率呈负相关。施氮量对水稻产量及其

构成因素均有极显著影响( $P < 0.01$ )；施氮条件下，控制灌溉模式水稻单位面积有效穗数、穗粒数、结实率高于浅湿灌溉和常规淹灌，而不同灌溉模式对水稻千

粒重影响并不显著( $P > 0.05$ )。由此可见，控制灌溉模式下适宜氮肥用量可通过形成足量大穗提高库容，并小幅增加结实率，使得水稻产量提升。

表 2 2020 年水稻产量及构成因素  
Table 2 Rice yields and its components in 2020

处理		单位面积有效穗数( $10^4/\text{hm}^2$ )	千粒重(g)	结实率(%)	穗粒数(粒/穗)	产量( $\text{kg}/\text{hm}^2$ )
灌溉模式	施氮量					
F	N0	307.93 d	27.13 a	92.63 a	71.49 d	5 367.40 d
	N1	355.05 c	26.04 b	89.44 b	83.28 c	6 679.60 c
	N2	416.18 b	26.08 b	89.35 b	91.42 b	8 551.62 b
	N3	438.36 a	25.93 b	87.96 c	95.58 a	9 463.05 a
S	N0	331.68 c	27.10 a	93.29 a	72.08 d	5 883.40 d
	N1	380.40 b	26.09 b	92.30 b	86.61 c	7 708.93 c
	N2	428.04 a	25.89 b	90.42 c	91.20 b	8 978.97 b
	N3	437.60 a	25.91 b	89.15 c	96.05 a	9 552.89 a
C	N0	305.52 c	27.21 a	93.92 a	67.73 c	5 142.01 d
	N1	395.79 b	26.15 b	93.07 a	90.41 b	8 551.02 c
	N2	450.49 a	26.22 b	91.40 b	99.29 a	10 272.57 a
	N3	454.32 a	25.67 b	89.54 c	98.40 a	9 914.52 a
方差分析	灌溉模式	29.27**	0.16	69.22**	23.18**	66.28**
	施氮量	592.47**	16.08**	179.72**	407.33**	864.54**
	灌溉模式×施氮量	9.79**	0.18	6.44**	8.81**	12.53*

注：同列数字后不同小写字母表示相同灌溉模式下不同施氮处理间差异显著( $P < 0.05$ )；\*表示影响达显著水平( $P < 0.05$ )，\*\*表示影响达极显著水平( $P < 0.01$ )；下同。

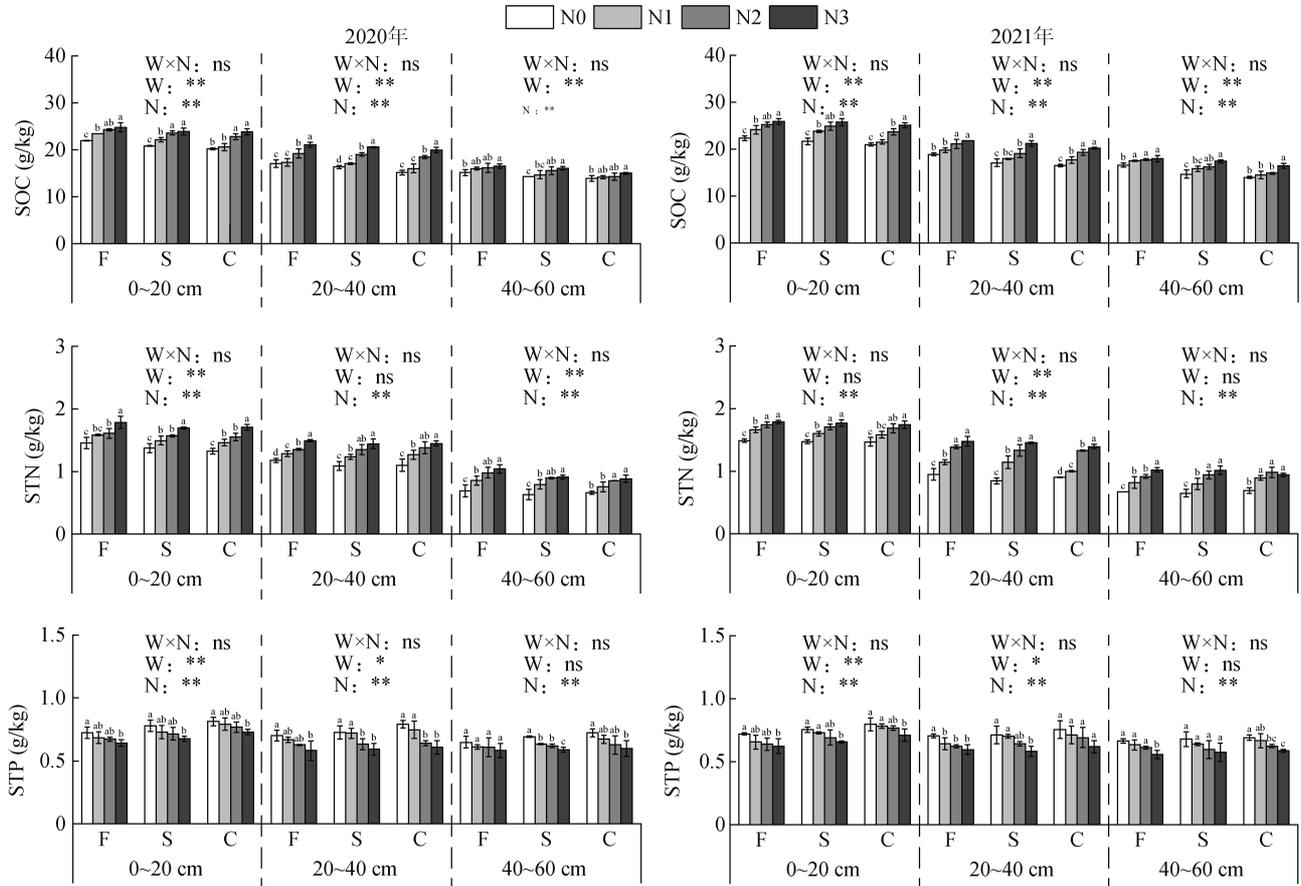
表 3 2021 年水稻产量及构成因素  
Table 3 Rice yields and its components in 2021

处理		单位面积有效穗数( $10^4/\text{hm}^2$ )	千粒重(g)	结实率(%)	穗粒数(粒/穗)	产量( $\text{kg}/\text{hm}^2$ )
灌溉模式	施氮量					
F	N0	301.01 c	27.44 a	92.50 a	71.64 d	5 217.32 d
	N1	366.93 b	26.23 b	88.81 b	82.13 c	6 888.68 c
	N2	430.02 a	26.32 b	88.57 b	88.41 b	8 519.22 b
	N3	437.12 a	25.87 b	87.40 c	94.59 a	9 399.10 a
S	N0	315.11 c	27.13 a	92.73 a	70.03 c	5 401.27 d
	N1	381.47 b	26.40 ab	92.43 a	84.07 c	7 651.29 c
	N2	433.73 a	25.80 ab	90.82 b	89.20 b	8 817.33 b
	N3	442.97 a	26.07 b	88.74 c	95.74 a	9 599.32 a
C	N0	295.36 c	27.09 a	94.05 a	71.51 c	5 256.74 d
	N1	389.16 b	26.02 b	92.86 b	90.96 b	8 397.55 c
	N2	448.67 a	26.34 b	91.36 c	97.01 a	10 111.76 a
	N3	447.31 a	25.95 b	89.68 d	97.61 a	9 987.26 a
方差分析	灌溉模式	9.67**	0.15	112.48**	51.83**	52.83**
	施氮量	814.4**	8.92**	160.93**	292.69**	663.04**
	灌溉模式×施氮量	4.45**	0.11	8.3**	9.04**	13.99*

### 2.2 水氮管理对土壤碳氮磷含量的影响

不同处理土壤碳氮磷含量如图 3 所示。SOC、STN 和 STP 含量与土层深度呈负相关，施氮量与 SOC、STN 含量呈正相关，与 STP 含量呈负相关，从土壤碳氮磷含量变化范围来看，年际间差异较小。施氮处理 SOC、STN 含量较 N0 处理分别增加 2.12%~18.62%、8.63%~51.37%，STP 含量较 N0 处理降低 1.11%~20.52%。灌溉模式和施氮量对 SOC 含量影

响极显著( $P<0.01$ )；施氮量对各土层 STN、STP 含量影响极显著( $P<0.01$ )，灌溉模式对各土层 STN 含量影响年际间存在差异。相同施氮量下，常规淹灌模式 SOC、STN 含量比浅湿灌溉模式提高 2.07%~9.99%、2.09%~10.01%，比控制灌溉模式分别提高 3.73%~16.99%、0.74%~12.91%；控制灌溉模式 STP 含量比浅湿灌溉模式提高 1.98%~9.01%，比常规淹灌模式提高 2.54%~17.40%。



(图中 W 表示灌溉模式, N 表示施氮量, W×N 表示灌溉模式和施氮量间的交互效应; \*表示影响显著( $P<0.05$ ), \*\*表示影响极显著( $P<0.01$ ); ns 表示影响不显著( $P>0.05$ ); 柱图上方不同小写字母表示相同灌溉模式下不同施氮处理间差异显著( $P<0.05$ ); 下同)

图 3 土壤碳氮磷含量

Fig. 3 Contents of soil carbon, nitrogen and phosphorus

### 2.3 水氮管理对土壤碳氮磷化学计量比的影响

不同水氮管理模式土壤碳氮磷化学计量比如图 4 所示。土壤 C/N 与土层深度呈正相关，与施氮量呈负相关，土壤 C/P、N/P 与土层深度呈负相关，与施氮量呈正相关。2020 年土壤 C/N、C/P、N/P 分别介于 12.60~22.61、19.14~38.57、0.91~2.77，2021 年分别为 13.57~24.71、20.25~41.73、0.96~2.88，仅从土壤碳氮磷化学计量比变化范围看，年际间差异较小。3 种灌溉模式下，各土层 C/N 较 N0 处理降低 0.55%~28.29%，C/P、N/P 较 N0 处理增加 4.38%~59.20%、11.63%~83.90%，各土层平均 C/N 随施氮

量增加而降低，C/P、N/P 随施氮量增加而减小。总体上，控制灌溉模式下土壤 C/N、C/P、N/P 低于其余两种灌溉模式，常规淹灌模式各土层平均 C/N、C/P、N/P 比浅湿灌溉模式提高 0.97%、9.49%、8.55%，比控制灌溉模式提高 5.36%、20.75%、14.66%。

### 2.4 水氮管理对土壤碳氮磷层化率的影响

土壤碳氮磷层化率如图 5 所示。施氮对土壤碳氮磷含量及化学计量比层化率影响极显著( $P<0.01$ )。2 年试验结果表明，各处理不同土层 SOC、STN、STP 层化率分别为 1.18~1.60、1.19~2.22、1.02~1.22，施氮提升 SOC、STP 层化率，降低 STN 层化率；相

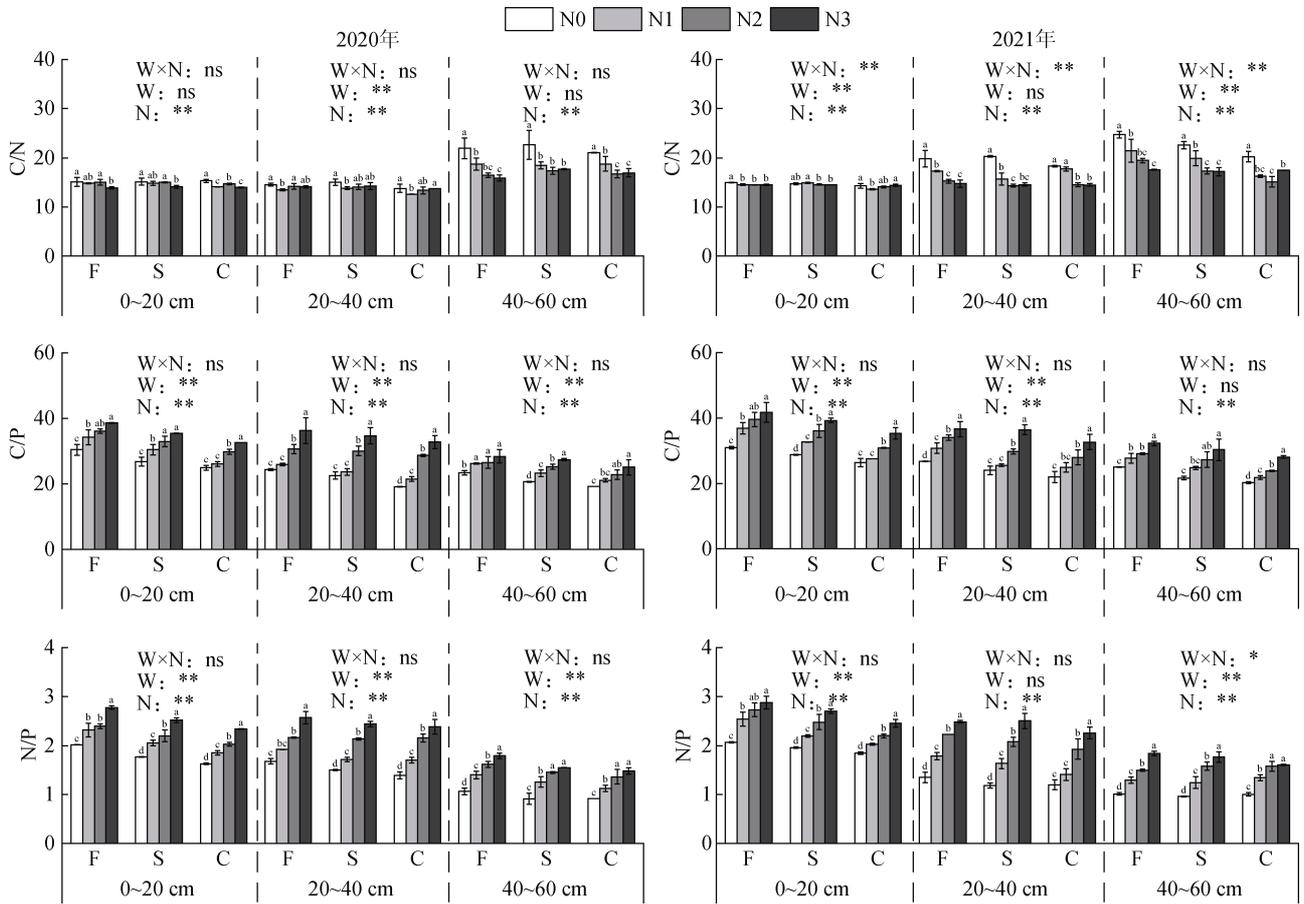


图 4 土壤碳氮磷化学计量比  
Fig. 4 Stoichiometric ratios of soil carbon, nitrogen and phosphorus

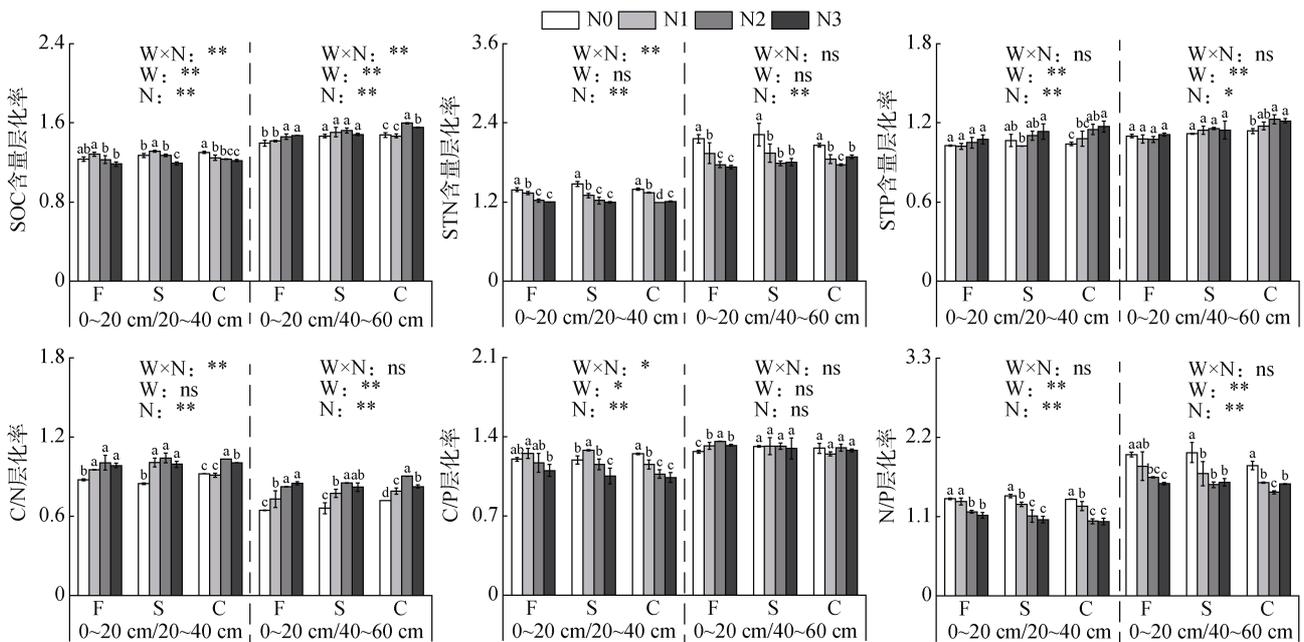


图 5 土壤碳氮磷层化率  
Fig. 5 Stratification rates of soil carbon, nitrogen and phosphorus

较常规淹灌模式，节水灌溉模式提升 SOC、STP 层化率。不同处理土层 C/N、C/P、N/P 层化率分别为 0.65 ~ 1.04、1.04 ~ 1.36、1.03 ~ 1.99，施氮提升各土

层 C/N 层化率，降低 C/P、N/P 层化率，节水灌溉模式较常规淹灌模式提升 C/N 层化率，控制灌溉模式 C/P、N/P 层化率低于常规淹灌和浅湿灌溉模式，N/P

层化率较 C/P 层化率的降幅更大。

## 2.5 土壤碳氮磷及水稻产量间的相关性

稻田土壤碳氮磷含量相关关系见图 6。SOC 和 STN 含量相关性随土层深度增加而降低,各土层 SOC 和 STP 含量、STN 和 STP 含量线性拟合程度较低

( $R^2 < 0.5$ ), 整体呈负相关。不同水氮管理模式下, 水稻产量与土壤碳氮磷的相关性见表 4, 水稻产量与土壤碳氮磷含量、化学计量关系高度相关, STN 含量、C/N 可能在表达水稻产量方面比土壤碳氮磷其余指标更据指导意义。

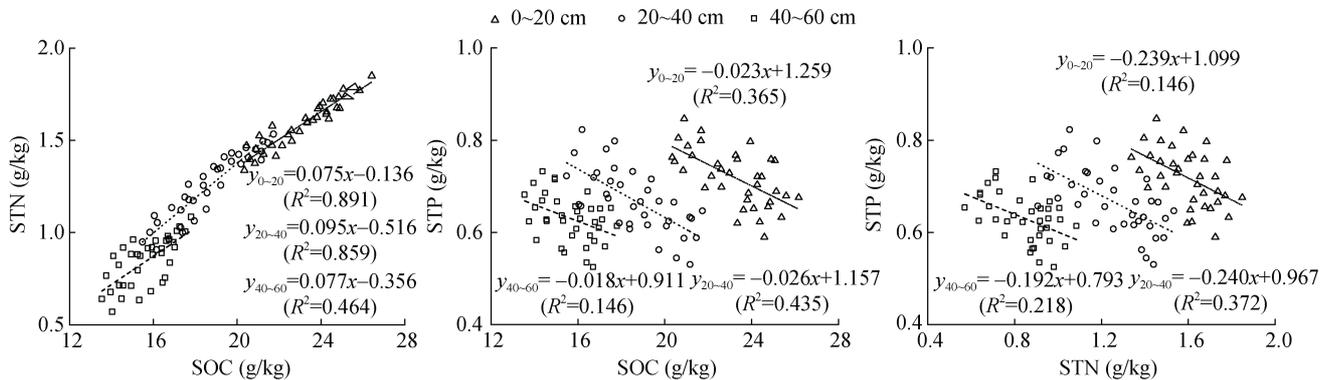


图 6 土壤碳氮磷含量间相关关系

Fig. 6 Correlations between contents of soil carbon, nitrogen and phosphorus

表 4 水稻产量和稻田土壤碳氮磷间的相关性

Table 4 Correlations between rice yield with soil carbon, nitrogen and phosphorus

	产量	SOC	STN	STP	C/N	C/P	N/P
产量	1						
SOC	0.645**	1					
STN	0.875**	0.913**	1				
STP	-0.484**	-0.639**	-0.561**	1			
C/N	-0.926**	-0.560**	-0.844**	0.319	1		
C/P	0.601**	0.885**	0.796**	-0.916**	-0.475**	1	
N/P	0.781**	0.894**	0.911**	-0.844**	-0.693**	0.962**	1

注: \*表示显著相关( $P < 0.05$ ), \*\*表示极显著相关( $P < 0.01$ )。

## 3 讨论

已有研究表明,长期施肥显著影响土壤有机质矿化过程,对提升稻田 SOC 含量起促进作用<sup>[17]</sup>。本研究中,施氮量与 SOC 含量呈正相关,这是由于高氮肥条件下,根茬和凋落物输入增多,提升了稻田系统有机物料水平,促使 SOC 含量升高<sup>[18]</sup>。本试验结果表明,常规淹灌模式显著提升 SOC 含量,这可能是由于常规淹灌模式下土壤通气性差,降低微生物活性,从而限制 SOC 分解过程,增加土壤有机碳固存。这与徐莹<sup>[19]</sup>关于节水灌溉对稻-油轮作土壤有机碳的影响机制的研究结果不同,该研究表明常规淹灌、湿润式间歇灌溉、干旱式间歇灌溉处理间 SOC 含量和储量均无显著差异,这可能与不同水分处理、不同种植模式下输入稻田的有机物总量存在差异、好氧土壤中微团聚体内颗粒有机碳与粉黏粒对有机物的物

理保护作用不同有关<sup>[20]</sup>。STN 含量与成土矿物、自然气候、农艺措施等因素关系密切,可用来表征土壤供氮水平。本研究中,施氮显著增加 0~60 cm 土层 STN 含量,这与杜建军等<sup>[21]</sup>研究结果类似,这是因为施氮提供了土壤脲酶酶促反应所需基质,提升了脲酶活性,同时补充了土壤微生物必需的氮素,促进了土壤微生物繁殖,从而有利于尿素水解,提升氮素供给。而骆坤等<sup>[22]</sup>研究发现,施氮仅对 0~20 cm 土层 STN 含量影响显著,对 20~40 cm 土层 STN 影响较小,这可能与不同作物类型、水肥管理方式等因素有关。不同灌溉模式通过改变田间水分状况、作物氮素利用等,使土壤氮循环过程产生变化,进而影响 STN 含量<sup>[23-24]</sup>。本试验表明,浅湿灌溉和控制灌溉模式相比常规淹灌模式,STN 含量略有下降,这可能是由于节水灌溉模式能改善土壤通气性,促进了土壤腐殖质的分解和微生物繁殖,植物吸氮量增加导致 STN

含量降低,但不同土层和年际存在差异性,还需更长时间序列加以验证。稻田土壤中磷素来源相对单一,输出途径主要是径流、渗漏损失和作物吸收利用。本研究中,浅湿灌溉和常规淹灌模式 STP 含量较控制灌溉模式更低,一方面是因为控制灌溉模式下水稻磷素累积量较低<sup>[14]</sup>,另一方面是因为控制灌溉模式下稻田径流、渗漏损失更小,更利于 STP 累积。而 STP 含量随施氮量增加而降低,相同灌溉模式下 STP 含量差异不显著,与叶玉适<sup>[25]</sup>的研究结果一致,这是由于施氮可提升土壤磷酸酶活性,增强土壤微生物活性并增加磷素供给,使作物磷素吸收量增加,从而降低 STP 含量。

自然因素和人为因素共同影响稻田土壤碳氮磷化学计量特征,土壤碳氮磷循环过程改变会导致养分平衡状态被打破,使稻田土壤碳氮磷的限制状况改变<sup>[26]</sup>。已有研究表明,土壤有机质分解速率取决于 C/N,比值高于 25 则土壤有机质累积,比值低于 25 则土壤有机质消耗,且 C/N 越低,氮素释放越快<sup>[27]</sup>。本研究中,不同土层土壤 C/N 均低于 25,但高于全国农田土壤 C/N,整体上土壤有机质处于消耗状态,表层土壤消耗速度更快,与朱奕豪等<sup>[28]</sup>研究结果相似。土壤 C/P 可表征磷矿化与磷素有效性,通常磷素有效性与 C/P 呈负相关<sup>[29]</sup>。本研究中,不同土层土壤 C/P 不超过 33,小于全国农田土壤 C/P,相关研究指出,C/P<200 时,土壤有机质净矿化<sup>[30]</sup>,说明研究区磷有效性较高,对作物生长有促进作用。土壤 N/P 一定程度上可反映土壤氮素供应情况,N/P<10 时,作物可利用的氮素相对缺乏<sup>[31]</sup>。本试验中,不同土层土壤 N/P 不超过 2.3,低于全国农田土壤 N/P,考虑到研究区 STN 含量高于全国平均,土壤供氮水平较高,因此,可以施当减少磷肥施用,调整优化土壤 N/P。

土壤养分层化率是表征土壤质量和生态功能的重要指标之一,受不同耕作措施、水肥管理模式、土壤理化性质、作物吸收利用等因素影响,能反映土壤演替方向,通常情况下,在一定范围内土壤养分层化率越高,土壤质量越好<sup>[32]</sup>。本研究中,施氮处理能提升不同土层平均 SOC、STP 含量层化率,降低 STN 含量层化率,这可能是由于土壤中氮素或施入稻田的氮肥迁移能力更强,在渗漏水的作用下易携带氮素由表层向更深层土壤迁移,使得表层土壤氮素和更深层土壤氮素含量差异变小,进而降低层化率。同时,相比常规淹灌模式,控制灌溉模式能提升不同土层 SOC、STP 含量层化率,在一定程度上说明控制灌溉

模式下配施适宜氮肥可以改善土壤质量。但该试验条件下土壤层化率是否达到了最佳值,仍需要结合稻田系统碳氮磷平衡以及其他相关指标进行深入分析,这将是今后进一步的研究重点。

## 4 结论

1) 常规淹灌和浅湿灌溉模式下,水稻产量随施氮量的增加而提高,但施氮量 110 kg/hm<sup>2</sup> 至 135 kg/hm<sup>2</sup> 水稻产量平均增幅较低。控制灌溉模式下适宜氮肥用量可通过改善水稻产量构成因素,使水稻产量提升,控制灌溉模式配施 110 kg/hm<sup>2</sup> 氮肥的处理产量最高。

2) 研究区土壤碳氮磷含量变化范围年际间差异较小,黑土稻作施氮增加土壤碳氮含量,降低土壤磷含量,灌溉模式对土壤有机碳的影响更大。

3) 从土壤碳氮磷化学计量特征来看,研究区整体上土壤有机质处于消耗状态,表层土壤消耗速度更快,同时土壤磷有效性、供氮水平较高,对作物生长有促进作用。相同施氮量下,控制灌溉模式降低各土层土壤碳氮磷化学计量比,土壤有机质消耗较常规淹灌和浅湿灌溉模式更高。

4) 施氮能提升不同土层平均 C/N 层化率,降低 C/P、N/P 层化率;相比常规淹灌模式,控制灌溉模式能提升不同土层 SOC、STP 含量层化率,在一定程度上说明控制灌溉模式下配施适宜氮肥可以改善土壤质量。

## 参考文献:

- [1] 黄薇,吴凉萍,宋路遥,等. 配施不同腐秆剂对还稻田麦秸腐解和水稻产量的影响[J]. 土壤, 2022, 54(1): 40-46.
- [2] 张作合,张忠学,郑衍波,等. 水炭运筹下稻田土壤氮素分布与盈亏 <sup>15</sup>N 示踪分析[J]. 农业机械学报, 2020, 51(6): 309-317, 395.
- [3] 张忠学,宋健,齐智娟,等. 控制灌溉氮肥减施对土壤氮素分布及氮素利用率的影响[J]. 东北农业大学学报, 2022, 53(3): 42-49, 60.
- [4] Singh P, Ghoshal N. Variation in total biological productivity and soil microbial biomass in rainfed agroecosystems: Impact of application of herbicide and soil amendments[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2010, 137(3/4): 241-250.
- [5] Zhu H X, Chen X M, Zhang Y. Temporal and spatial variability of nitrogen in rice-wheat rotation in field scale[J]. Environmental Earth Sciences, 2013, 68(2): 585-590.
- [6] 杨文,周脚根,王美慧,等. 亚热带丘陵小流域土壤碳氮磷生态计量特征的空间分异性[J]. 土壤学报, 2015,

- 52(6): 1336–1344.
- [7] Ågren G I. Stoichiometry and nutrition of plant growth in natural communities[J]. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2008, 39: 153–170.
- [8] 郑恩楠, 朱银浩, 胡建宇, 等. 水肥耦合对水稻生长土壤呼吸与无机氮的影响[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(9): 272–279.
- [9] Bui E N, Henderson B L. C: N: P stoichiometry in Australian soils with respect to vegetation and environmental factors[J]. *Plant and Soil*, 2013, 373(1): 553–568.
- [10] Li Y, Wu J S, Liu S L, et al. Is the C: N: P stoichiometry in soil and soil microbial biomass related to the landscape and land use in southern subtropical China?[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2012, 26(4): 4002.
- [11] 宋亚辉, 艾泽民, 乔磊磊, 等. 施肥对黄土高原农地土壤碳氮磷生态化学计量比的影响[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(6): 38–45, 52.
- [12] Wang M M, Chen H S, Zhang W, et al. Soil nutrients and stoichiometric ratios as affected by land use and lithology at county scale in a karst area, southwest China[J]. *Science of The Total Environment*, 2018, 619–620:1299–1307.
- [13] 陈春兰, 陈安磊, 魏文学, 等. 长期施肥对红壤稻田剖面土壤碳氮累积的影响[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(2): 14–20.
- [14] Zheng S M, Xia Y H, Hu Y J, et al. Stoichiometry of carbon, nitrogen, and phosphorus in soil: Effects of agricultural land use and climate at a continental scale[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 209: 104903.
- [15] 杜映妮, 李天阳, 何丙辉, 等. 长期施肥和耕作下紫色土坡耕地土壤 C、N、P 和 K 化学计量特征[J]. *环境科学*, 2020, 41(1): 394–402.
- [16] 秦子元, 张忠学, 孙迪, 等. 水氮耦合对黑土稻作产量与氮素吸收利用的影响[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(12): 324–335, 357.
- [17] 侯贤清, 李荣, 吴鹏年, 等. 秸秆还田配施氮肥对土壤碳氮含量与玉米生长的影响[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(9): 238–246.
- [18] Dong W Y, Zhang X Y, Wang H M, et al. Effect of different fertilizer application on the soil fertility of paddy soils in red soil region of Southern China[J]. *PLoS One*, 2012, 7(9): e44504.
- [19] 徐莹. 稻田节水灌溉对稻—油轮作温室气体排放及土壤有机碳的影响机制[D]. 武汉: 华中农业大学, 2016.
- [20] Tian K, Zhao Y C, Xu X H, et al. Effects of long-term fertilization and residue management on soil organic carbon changes in paddy soils of China: A meta-analysis[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, 204: 40–50.
- [21] 杜建军, 李生秀, 李世清, 等. 不同肥水条件对旱地土壤供氮能力的影响[J]. *西北农业大学学报*, 1998, 26(6): 1–5.
- [22] 骆坤, 胡荣桂, 张文菊, 等. 黑土有机碳、氮及其活性对长期施肥的响应[J]. *环境科学*, 2013, 34(2): 676–684.
- [23] 景峰, 郭成藏, 谈建鑫, 等. 新疆绿洲长期连作棉田土壤氮储量及其垂直分布特征[J]. *农业资源与环境学报*, 2015, 32(6): 545–551.
- [24] Ye Y S, Liang X Q, Chen Y X, et al. Carbon, nitrogen and phosphorus accumulation and partitioning, and C: N: P stoichiometry in late-season rice under different water and nitrogen managements[J]. *PLoS One*, 2014, 9(7): e101776.
- [25] 叶玉适. 水肥耦合管理对稻田生源要素碳氮磷迁移转化的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [26] Ai Z M, Xue S, Wang G L, et al. Responses of non-structural carbohydrates and C: N: P stoichiometry of *Bothriochloa ischaemum* to nitrogen addition on the loess plateau, China[J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2017, 36(3): 714–722.
- [27] 李培玺, 储炳银, 滕臻, 等. 巢湖湖滨带不同植被类型土壤碳氮磷生态化学计量学特征[J]. *草业科学*, 2020, 37(8): 1448–1457.
- [28] 朱奕豪, 刘晓丽, 陈为峰, 等. 黄河三角洲废弃盐田复垦土壤碳氮磷生态化学计量学特征[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(6): 352–360.
- [29] Müller M, Oelmann Y, Schickhoff U, et al. Himalayan treeline soil and foliar C: N: P stoichiometry indicate nutrient shortage with elevation[J]. *Geoderma*, 2017, 291: 21–32.
- [30] 杨羽, 夏品华, 林陶, 等. 贵州草海湿地不同水位梯度土壤碳、氮、磷含量及其生态化学计量比分布特征[J]. *湖泊科学*, 2020, 32(1): 164–172.
- [31] Smith V H. Effects of nitrogen: Phosphorus supply ratios on nitrogen fixation in agricultural and pastoral ecosystems[J]. *Biogeochemistry*, 1992, 18(1): 19–35.
- [32] Franzluebbers A J. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality[J]. *Soil and Tillage Research*, 2002, 66(2): 95–106.