

DOI: 10.20103/j.stxb.202401200178

吴姗姗, 吴金芝, 赵凯男, 张军, 李爽, 黄明, 李友军. 灌溉、耕作和施氮对旱地农田土壤生态化学计量特征的影响. 生态学报, 2024, 44(22): 10377-10390.

Wu S W, Wu J Z, Zhao K N, Zhang J, Li S, Huang M, Li Y J. Effects of irrigation, tillage, and nitrogen application on soil ecological stoichiometry characteristics in dryland. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(22): 10377-10390.

灌溉、耕作和施氮对旱地农田土壤生态化学计量特征的影响

吴姗姗, 吴金芝, 赵凯男, 张 军, 李 爽, 黄 明, 李友军*

河南科技大学农学院, 洛阳 471023

摘要:为了探讨灌溉、耕作和施氮对旱地农田土壤生态化学特征的影响, 基于 2019—2023 年的 3 因素裂-裂区田间定位试验, 设置主区为不灌溉(I0)和一次灌溉(I1)两个灌溉水平; 裂区为翻耕(PT)、旋耕(RT)、深松(SS)三种耕作方式; 裂-裂区为四种施氮模式, 施氮时期因灌溉而异, I0 下全部基施, I1 下 50% 基施、50% 灌溉前追施, 但施氮量都分别为 0(N0)、120(N120)、180(N180)和 240(N240) kg/hm², 研究了 2023 年小麦成熟期 0—100 cm 整土及各土层土壤总碳(TC)、全氮(TN)、全磷(TP)含量及其生态化学计量比。结果表明: (1) 对于 0—100 cm 土层整土, I1 与 I0 相比, 土壤 TC、TN 和 TP 含量分别降低 35.1%、15.0% 和 2.4%, C:N、C:P 和 N:P 分别降低 14.7%、24.6% 和 10.5%; 除土壤 TN 含量和 N:P 外, 土壤其他养分含量及其生态化学计量比在耕作方式间存在显著差异; 随施氮量的增加, 土壤 TN 和 N:P 呈现先增加后稳定的趋势, 但土壤 TC、TP、C:N 和 C:P 无显著变化。(2) 灌溉、耕作和施氮对土壤养分含量及其生态化学计量比的影响效应因土层而异。I1 显著降低 0—20 cm、20—40 cm、40—60 cm、60—80 cm 和 80—100 cm 土层土壤 TC 和 TN 含量, 但土壤 TP 含量仅在 60 cm 以下土层显著降低。其中, 与 I0 相比, I1 下土壤 TC 含量在各土层的降低幅度均随土层深度的增加而增大; 土壤 TN 的降低幅度则随土层深度先降低后增加。SS 较 RT 和 PT 能够提升各土层 TC 和 TP 含量, 且提升幅度随土壤深度增加而减小。灌溉和耕作影响各土层的 C:N 和 C:P, 但灌溉仅对 40 cm 以下土壤 N:P 有显著影响。施氮对土壤 TN 含量的影响随土层加深而减小, 且不影响除土壤 TN 含量和表层土壤 C:N 外的土壤养分含量及其生态化学计量比。(3) 耕作和灌溉是影响旱地农田土壤养分和其生态化学计量比的主要因素, 其贡献率分别为 59% 和 19%, 且灌溉可使耕作间的差异减小。总之, 一次灌溉虽降低土壤 TC、TN 和 TP 含量及其比值, 不利于土壤养分的维持, 但其配合深松和施氮量 180 kg/hm² 可保障土壤肥力, 实现旱地农田可持续发展。

关键词:灌溉; 耕作; 施氮; 总碳; 全氮; 全磷; 生态化学计量特征

Effects of irrigation, tillage, and nitrogen application on soil ecological stoichiometry characteristics in dryland

WU Shanwei, WU Jinzhi, ZHAO Kainan, ZHANG Jun, LI Shuang, HUANG Ming, LI Youjun*

College of Agriculture, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China

Abstract: To explore the impacts of irrigation, tillage, and nitrogen application on soil ecological stoichiometry characteristics in dryland, a field experiment was conducted using a split-split plot design with three replications from 2019 to 2023. There were two irrigation levels in the main plots: non-irrigation (I0) and one-off irrigation (I1), three tillage methods in the subplots: plowing tillage (PT), rotary tillage (RT), and sub-soiling (SS), and four nitrogen (N) application rates in the sub-subplots: 0 (N0), 120 (N120), 180 (N180), and 240 (N240) kg/hm². For I0, all N fertilizers were broadcast in the plot, while for I1, 50% of N fertilizer was broadcast in the plot and the other 50% N

基金项目: 河南省科技攻关项目 (232102111009, 2221021110087); 国家重点研发计划项目 (2022YFD2300800); 河南省自然科学基金 (242300420598)

收稿日期: 2024-01-20; **网络出版日期:** 2024-08-22

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lyj@haust.edu.cn

fertilizer was applied with irrigation. Soil samples were collected after wheat harvest in 2023 for analysis of soil total carbon (TC), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) contents, and their stoichiometric ratios at 0—100 cm soil depth. The results showed that: 1) For the whole profile of 0—100 cm soil depth, I1 decreased soil TC, TN, and TP contents by 35.1%, 15.0%, and 2.4%, and decreased soil C:N, C:P, and N:P ratios by 14.7%, 24.6%, and 10.5%, respectively, comparing with I0. Soil nutrients and their stoichiometric ratios, except for soil TN contents and N:P, showed significant differences among the three tillage practices. Additionally, soil TN contents and N:P increased with the increase of N application rates, while soil TC contents, TN contents, C:N, and C:P showed no significant differences among four N application rates. 2) Effects of irrigation, tillage, and nitrogen application on soil nutrients contents and their ecological stoichiometry characteristics varied with soil depths. I1 significantly decreased soil TC and TN contents at 0—20 cm, 20—40 cm, 40—60 cm, 60—80 cm and 80—100 cm soil depth, while decreased soil TP contents at 60—80 cm and 80—100 cm soil depths. Specifically, the variation of soil TC contents in each soil layer increased with soil depth. The variation of soil TN contents decreased first and then increased with soil depth. In the case of tillage, the SS increased soil TC and TP contents in each soil depth compared to RT and PT, and the variations decreased with soil depth. The irrigation and tillage had a markedly influence on soil C:N and C:P in each depth, while irrigation had significant effects on soil N:P for soils below 40 cm depth. The effect of N application rates on soil TN content decreased with soil depth, and N application had no markedly effect on soil nutrients and their ecological stoichiometry characteristics, except for soil TN contents and topsoil C:N. 3) The variation of soil nutrients and their ecological stoichiometry characteristics were significantly influenced by tillage and irrigation, which explain 59% and 19%, respectively. Besides, irrigation could reduce the differences among three tillage practices. Overall, one-off irrigation decreased soil TC, TN, TP, and their ratios, which is not benefited to maintain soil nutrients, but its combination with SS and N180 can ensure soil fertility and achieve sustainable development of dryland.

Key Words: irrigation; tillage; nitrogen application; total carbon; total nitrogen; total phosphorus; ecological stoichiometry characteristics

提升农田土壤肥力是实现国家“藏粮于地、藏粮于技”战略的基础。碳(C)、氮(N)和磷(P)是土壤养分的主要组成部分,同时也是植物生长的基础元素,其含量是衡量土壤肥力的重要指标^[1]。土壤 C:N:P 化学计量特征常被用于探索 C、N 和 P 元素之间的平衡和相互作用^[2]、生物多样性^[3]以及生态系统养分循环^[4],同时也是判断土壤肥力的重要指标。其中,土壤 C:N 可影响土壤中的 C 和 N 循环,也可反映土壤 C 和 N 养分矿化和固持是否平衡^[5],是土壤质量的敏感指标之一^[6]。土壤 C:P 可衡量土壤固磷潜力,高 C:P 说明土壤磷的有效性较低。土壤 N:P 则是预测养分限制的主要指标。因此,开展土壤 C:N:P 化学计量特征研究对于农田土壤提升肥力、增加固碳、判断养分限制性元素等具有重要意义^[7–8]。

前人研究表明,灌溉、耕作和施氮多对农田土壤生态化学计量特征具有显著影响^[6]。Wang 等^[9]在亚热带地区的研究发现,与雨养条件相比,灌溉能显著降低 0—20 cm 玉米土壤 C 和 N 含量。在黄土高原的研究发现,灌溉对 0—40 cm 麦田土壤养分及其生态化学计量比的影响与灌溉量有关,随灌溉量增加土壤 C 和 N 含量越小,且随深度的增加,其变化幅度越大,但对土壤 P 无显著影响^[10]。而在陇中半干旱区,0—40 cm 麦田土壤 C 和 N 含量随灌溉量的增加呈先增大后减小的趋势,P 含量受灌水量影响较小^[11],且在各土层变化趋势基本一致。张恒嘉和黄高宝^[12]的研究表明,灌溉不利于 0—40 cm 麦田土壤固碳稳磷,显著降低了土壤 C:N,增加了 C:P。传统耕作能够造成土壤 C 损失达 $0.17\text{—}1.00\text{ t hm}^{-2}\text{ a}^{-1}$ ^[13],而深松(SS)和免耕等对土壤干扰的较少的保护性耕作常被认为是提高土壤 C 累积、降低土壤 N 残留的有效方法^[14–17]。Ren 等^[18]对 0—30 cm 旱地麦田土壤的研究发现,SS 能够显著提高旱地麦田土壤 C 含量,且主要集中在 20—30 cm 土层,但对各土层 N 含量无显著影响,进而提高土壤 C:N、C:P 和 N:P,维持土壤生态化学计量特征的稳定。吴林甲等^[19]

的研究也同样发现,SS 是实现旱地农田土壤固碳供氮的重要方式。此外,SS 能提高 0—50 cm 土壤 C 含量^[20—22],而翻耕(PT)对于 10—20 cm 土壤 C、N 提高最明显^[23]。然而,也有一些研究表明,长期持续采用 SS 可能会导致土壤其他物理性质的恶化。张琦等^[24]的研究发现长期 SS 会使深层土壤孔隙度过度增加,影响根系生长。施氮对农田生态化学计量特征的影响效应尚不明确。有研究表明,施氮对土壤生态计量特征有显著影响^[25],且对土壤 C 含量的影响与施氮时间有关^[26]。也有研究表明,施氮虽然会影响土壤 P 含量,但对土壤生态化学计量特征的影响较小^[27—28]。由此可见,长期单一采用一种栽培措施,对土壤养分及其生态化学计量特征的影响是不稳定的。为了避免单一栽培措施对土壤影响的不稳定性,灌溉、耕作和施氮等多种措施配合被认为是有效的土壤培肥方式。Trost 等^[29]的研究表明,施氮和灌溉并不能显著提高土壤 C 含量。也有一些研究发现,过量灌水和施氮会降低土壤 C 含量,不利于土壤固碳^[30],而合理的灌溉和施氮配合可显著促进耕层土壤 C 的积累^[31]。此外,SS 配合施氮能显著增加土壤 C 和 N 含量,调节土壤 C:N^[32]。但目前针对灌溉、耕作和施氮三因素效应对农田土壤生态化学计量特征的研究还比较缺乏。因此,选取适宜的耕作制度有助于保持土壤生态化学计量特征平衡,有利于改善土壤质量,保障农业可持续发展。

旱地农业区是我国重要的粮食主产区之一,在保障粮食安全中发挥着重要作用。长期以来,旱地农业主要依靠雨养,加之耕作管理粗放、施肥不科学等问题,导致干旱缺水和土壤贫瘠一直是广大旱地作物增产的两大非生物限制因素^[33]。近年来,随着我国高标准农田建设项目的推进,旱地农业区的灌溉条件得到改善,相当部分农田可实现“一次灌溉”。一次灌溉条件下,SS 和施氮量在 180 kg/hm²有利于旱地小麦高产、高效及低硝态氮残留^[34],但其土壤生态化学计量特征如何尚不明确。鉴于此,本研究基于始于 2019 年的灌溉、耕作和施氮 3 因素裂-裂区定位试验,探讨了 0—100 cm 土层整土及 0—100 cm 各土层土壤总碳(TC)、全氮(TN)、全磷(TP)含量及其化学计量比,以期为旱地农田土壤的固碳、减排、培肥、可持续发展提供理论基础和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地位于河南省伊川县鸦岭镇杜沟村(34°44' N, 112°40' E),为典型的旱地作物种植区。该地区属于温带大陆性气候,年平均气温 14.5 °C,年均降水量 571 mm,土壤类型为重壤土。试验起始时 0—20 cm 土壤基本理化性质为:pH 7.97,容重 1.35 g/cm³,总碳、全氮、全磷含量分别为 12.19 g/kg、1.08 g/kg、0.35 g/kg,速效磷、速效钾含量分别为 12.70 g/kg、117.10 g/kg。

1.2 试验设计和田间管理

田间定位试验开始于 2019 年 10 月,试验采用三因素裂-裂区设计。主区为全生育期不灌溉(I0)和一次灌溉(I1)两个水平;裂区为翻耕(PT)、旋耕(RT)和深松(SS)三种耕作模式;裂-裂区施氮模式,施氮时期因灌溉而异,I0 下全部基施,I1 下 50%基施、50%灌溉前追施,施氮量分别为 0(N0)、120(N120)、180(N180)和 240(N240)kg/hm²,每个处理重复 3 次,小区面积为 32 m²(4 m×8 m),具体处理描述见表 1。灌溉量用水表控制,采用测墒补灌技术,补灌量(mm)= $10 \times \rho b \times H \times (\beta_i - \beta_j)$ ^[35],其中 H 为计划湿润土层深度(cm); β_i 为 0—40 cm 土层目标土壤含水量的平均值; β_j 为补灌前 0—40 cm 土层土壤含水量的平均值; ρb 为计划湿润层内土壤平均容重(g/cm³)。补灌量和补灌时间见表 2。供试化肥分别为尿素(含 N 46%)、过磷酸钙(含 P₂O₅ 12%)和硫酸钾(含 K₂O 50%),其中磷钾肥施肥量分别为 90 kg P₂O₅/hm²和 60 kg K₂O/hm²。供试小麦品种为“洛旱 22”,于 10 月中下旬播种,6 月初收获,理论播种量为 187.5 kg/hm²,行距 20 cm。其他田间管理按照当地农民习惯进行。

1.3 土壤 TC、TN 和 TP 含量的测定

于 2023 年 6 月小麦收获期,在每个小区,采用五点采样法^[36],用直径 4.0 cm 的土钻分别采集 0—100 cm 土层整土,将同一小区的所有土壤除去杂草、砾石等杂质混合均匀后留取 300 g。同时在所取土洞旁 10 cm 处

采集不同土层土壤样品,每 20 cm 为一个土层,深度为 100 cm,同一小区同一土层的土样除去杂草、砾石等杂质混合均匀后同样留取 300 g。土样带回实验室置于阴凉通风处自然风干,风干后过 0.15 mm 筛用于测定土壤 TC、TN 和 TP 含量。

表 1 处理描述

Table 1 Treatment description in the experiment

区域 Plot	处理 Treatment	代码 Code	描述 Description
主区 Main plot	不灌溉	I0	全生育时期不灌溉。
	一次灌溉	I1	小麦返青后 0—40 cm 土层土壤含水量第一次低于田间持水量的 60% 时,补灌至田间持水量的 85%,小麦返青后每 3 天测一次含水量。
裂区 Split plot	翻耕	PT	翻耕采用铧式犁翻耕(30—35 cm)后,使用旋耕机旋耕一遍。
	旋耕	RT	旋耕仅采用旋耕机作业,整地深度为 10—15 cm。
	深松	SS	采用深松机耕作(35—40 cm)后,使用旋耕机旋耕一遍。
裂-裂区 Split-split plot	施氮肥 0 kg/hm ²	N0	不施氮
	施氮肥 120 kg/hm ²	N120	施氮量为 120 kg/hm ² (施尿素量为 261 kg/hm ²)
	施氮肥 180 kg/hm ²	N180	施氮量为 180 kg/hm ² (施尿素量为 391 kg/hm ²)
	施氮肥 240 kg/hm ²	N240	施氮量为 240 kg/hm ² (施尿素量为 522 kg/hm ²)

I0:不灌溉 non-irrigation;I1:一次灌溉 one-off irrigation;PT:翻耕 plowing tillage;RT:旋耕 rotary tillage;SS:深松 sub-soiling;N0:施氮量 0 kg/hm² nitrogen rates were 0 kg/hm²;N120:施氮量 120 kg/hm² nitrogen rates were 120 kg/hm²;N180:施氮量 180 kg/hm² nitrogen rates were 180 kg/hm²;N240:施氮量 240 kg/hm² nitrogen rates were 240 kg/hm²

表 2 试验期间灌水量

Table 2 The irrigation amount in the experimental years

年度 Year	灌溉日期 Irrigation date	耕作方式 Tillage	补灌前土壤含水量 Soil water content before supplementary irrigation/%	目标含水量 Target soil water content/%	灌水量 Irrigation amount/mm
2019—2020	2020-02-15	PT	14.7	22.1	39.7
		RT	14.5	22.1	41.1
		SS	15.2	22.1	37.2
2020—2021	2021-02-25	PT	14.3	22.1	42.1
		RT	14.1	22.1	43.2
		SS	14.7	22.1	40.1
2021—2022	2022-03-03	PT	15.0	22.1	39.4
		RT	15.1	22.1	37.8
		SS	14.8	22.1	38.3
2022—2023	2023-03-15	PT	15.6	22.1	35.1
		RT	15.2	22.1	38.1
		SS	14.9	22.1	37.7

土壤 TC 和 TN 测定:称取土壤样品 200 mg 放入锡箔纸中并用压样器包样,将压好的样品放入元素分析仪(Vario MACRO cube,Elementar,Germany),通过燃烧法测定 TC 和 TN 含量^[37]。

土壤 TP 含量测定:采用 HClO₄—H₂SO₄法进行消煮,过滤后采用消解—钼锑抗分光光度法,用可见分光光度计(T6 新锐,北京普析)测定消溶液中的 TP 含量^[38]。

1.4 数据处理

为了使土壤生态化学计量特征研究更全面,土壤 C:N、C:P 和 N:P 用土壤 TC、TN 和 TP 含量进行计算^[37,39—40]。采用 Microsoft Excel 2016 处理试验数据。用 SPSS 19.0 对数据进行统计分析,利用 Duncan 法进行差异显著性检验,显著水平为 0.05。用 Origin 2022 做 Pearson 相关分析和主成分分析。方差分解分析用 R

(R Core Team, 2012)中的“vegan”包获得^[37],其中 I 代表两种灌溉方式,T 代表三种耕作方式,N 代表四种氮肥用量,土壤养分及生态化学计量比是指 0—100 cm 土层整土 TC、TN 和 TP 含量以及 C:N、C:P 和 N:P^[37]。图表绘制采用 Origin 2022。

2 结果与分析

2.1 灌溉、耕作和施氮对旱地农田土壤 TC 含量的影响

除施氮外,灌溉和耕作及各因素互作对 0—100 cm 土层整土 TC 含量均有显著影响(图 1)。I1 较 I0 整土 TC 含量显著降低了 35.1%。SS 较 RT 和 PT 整土 TC 含量分别显著提高 18.2%和 89.6%,其中,I0 下分别增加 13.4%和 115.8%,I1 下分别提高 25.6%和 62.2%。施氮对整土 TC 含量无显著影响,且无论是 I0 和 I1 下,随施氮量的增加,整土 TC 含量均没有规律性变化。

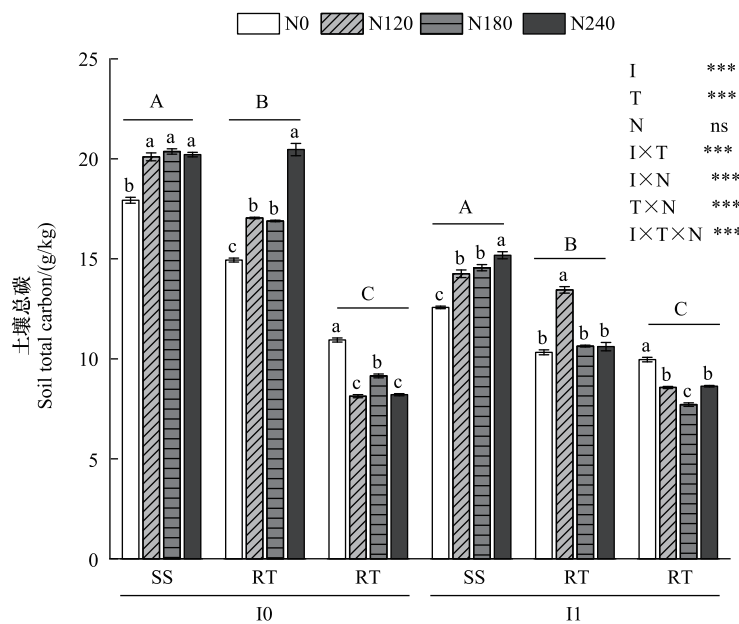


图 1 不同处理对 0—100 cm 土层整土全氮含量的影响

Fig.1 Effects of different treatments on soil total carbon contents in 0—100 cm

不同小写字母表示相同耕作下不同施氮方式间差异在 $P<0.05$ 水平显著,不同大写字母表示相同灌溉下不同耕作处理间差异在 $P<0.05$ 水平显著;ns 表示未达到显著差异;* 表示差异水平在 $P<0.05$ 达到显著;** 表示差异水平在 $P<0.01$ 达到显著;*** 表示差异水平在 $P<0.001$ 达到显著;I:灌溉,T:耕作,N:施氮;I0:全生育期不灌溉;I1:一次灌溉;SS:深松;RT:旋耕;PT:翻耕;N0:不施氮;N120:施氮量 120 kg/hm²;N180:施氮量 180 kg/hm²;N240:施氮量 240 kg/hm²

分析 0—100 cm 不同土层土壤 TC 含量(表 3)发现,灌溉和耕作对各土层土壤 TC 含量均表现出显著的调控效应,但施氮对其均无显著影响。与 I0 相比,I1 显著降低各土层的 TC 含量,在 0—20 cm、20—40 cm、40—60 cm、60—80 cm 和 80—100 cm 土层,分别降低了 12.7%、19.4%、34.8%、36.6%和 36.7%,表现出随深度增加降低幅度增大的趋势。与 PT 相比,SS 和 RT 在 0—20 cm 土层土壤 TC 含量显著提高 34.9%和 33.0%,而在其余土层均表现为 SS>RT>PT($P<0.05$)。

2.2 灌溉、耕作和施氮对旱地农田土壤 TN 含量的影响

除耕作外,灌溉、施氮及各因素互作对 0—100 cm 土层整土 TN 含量均有显著影响(图 2)。整体来看,I1 较 I0 整土 TN 含量降低 15.0%。N180 和 N240 间整土 TN 含量无显著差异,但较 N0 分别显著提高 22.4%和 25.9%,较 N120 分别显著提高 8.8%和 11.9%。不同灌溉和耕作条件下施氮对整土 TN 含量的影响有所差异,但均呈先增加后稳定的趋势,且 N180 和 N240 间无显著差异。进一步分析可知,耕作对整土 TN 含量的影响

因灌溉水平而异,在 I0 处理下 SS 和 RT 较 PT 分别显著提高 8.8%和 12.9%,但在 I1 下无显著差异。

表 3 不同处理对不同土层土壤 TC 含量的影响/(g/kg)

Table 3 Effects of different treatments on soil total carbon contents of different depths

处理 Treatment		土层 Soil depth				
		0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm	60—80 cm	80—100 cm
灌溉	I1	19.10±2.29b	14.00±2.47b	9.81±3.27b	8.22±3.21b	6.39±2.67b
Irrigation	I0	21.88±3.94a	17.37±5.33a	15.04±6.04a	12.97±5.18a	10.09±4.35a
耕作	PT	16.71±1.28b	11.15±1.17c	7.17±1.24c	5.53±1.77c	4.63±1.96c
Tillage	RT	22.22±1.88a	16.70±3.91b	13.27±5.37b	11.97±4.3b	7.96±2.89b
	SS	22.54±3.22a	19.20±3.05a	16.84±3.59a	14.28±3.12a	12.13±2.94a
施氮	N0	19.89±2.15a	15.06±2.89a	11.46±3.31a	10.29±4.17a	7.77±3.44a
Nitrogen application	N120	20.73±3.85a	16.37±4.17a	12.41±5.60a	10.41±4.59a	8.64±4.44a
	N180	20.35±3.76a	15.18±5.50a	12.54±5.92a	10.57±4.82a	8.03±3.77a
	N240	20.98±4.08a	16.12±5.07a	13.28±6.86a	11.10±6.03a	8.51±4.66a

表中数值为平均值±标准差(SD),不同字母表示同一土层不同处理间的差异在 $P<0.05$ 水平显著

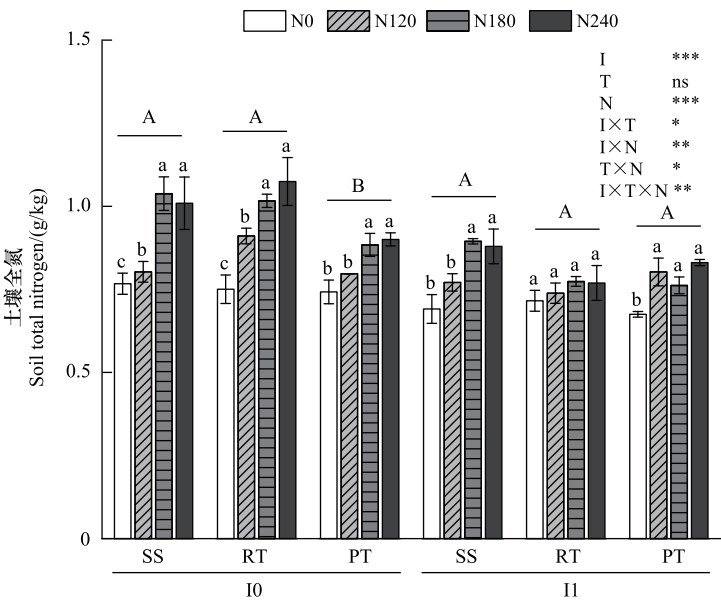


图 2 不同处理对 0—100 cm 土层整土全氮含量的影响

Fig.2 Effects of different treatments on soil total nitrogen contents in 0—100 cm

对不同土层土壤 TN 含量(表 4)分析可知,土壤 TN 含量随深度的增加而降低,其对灌溉、耕作和施氮的响应因土层而异。与 I0 相比,I1 在 0—20 cm、20—40 cm、60—80 cm 和 80—100 cm 土层土壤 TN 含量显著降低 8.7%—22.0%。SS 在 40—60 cm 土层土壤 TN 含量较 RT 和 PT 分别显著提高 7.2%和 11.9%,而在其他土层未表现出显著差异。N240 和 N180 间各土层土壤 TN 含量均无显著差异,其在 0—20 cm 土层中较 N0 分别显著提高 47.9%和 35.1%,较 N120 分别显著提高 27.5%和 16.5%;在 20—40 cm 土层较 N0 分别显著提高 29.1%和 21.5%,较 N120 分别显著提高 15.9%和 9.1%;在 40—100 cm 各土层均较 N120 无显著差异,但较 N0 均显著提高,说明不施氮会导致旱地农田各土层土壤 TN 含量降低,但施氮对土壤 TN 含量的提升效应会随土层的加深而减小,且高量施氮并没有增加土壤 TN 含量。

2.3 灌溉、耕作和施氮对旱地农田土壤 TP 含量的影响

除施氮外,灌溉、耕作及因素互作均对旱地 0—100 cm 土层整土 TP 有显著调控效应(图 3)。I1 与 I0 相

比使土壤 TP 含量显著降低 2.4%。SS 和 RT 较 PT 使整土 TP 含量分别显著提高 3.5% 和 4.3%。但在不同灌溉条件下耕作方式间的差异略有不同,在 I1 条件下 SS 和 RT 较 PT 分别提高 8.9% 和 6.3%,但 I0 下增幅不显著。在不同灌溉和耕作处理下,施氮对整土 TP 含量的影响有所差异,但均呈现先稳定后增加的趋势,且均在 N240 达到最大值。

表 4 不同处理对不同土层土壤 TN 含量的影响/(g/kg)

Table 4 Effects of different treatments on soil total nitrogen contents of different depths

处理 Treatment		土层 Soil depth				
		0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm	60—80 cm	80—100 cm
灌溉 Irrigation	I1	1.03±0.15b	0.85±0.09b	0.68±0.09a	0.63±0.07b	0.56±0.74b
	I0	1.32±0.27a	0.97±0.19a	0.73±0.10a	0.69±0.10a	0.63±0.09a
耕作 Tillage	PT	1.12±0.21a	0.87±0.11a	0.67±0.06b	0.63±0.06a	0.58±0.08a
	RT	1.21±0.30a	0.94±0.21a	0.69±0.11b	0.67±0.11a	0.60±0.10a
施氮 Nitrogen application	SS	1.20±0.26a	0.92±0.14a	0.75±0.10a	0.67±0.09a	0.60±0.10a
	N0	0.94±0.12c	0.79±0.07c	0.64±0.07b	0.60±0.07b	0.53±0.08b
	N120	1.09±0.13b	0.88±0.11bc	0.71±0.08a	0.66±0.10a	0.60±0.08a
	N180	1.27±0.20a	0.96±0.16ab	0.74±0.10a	0.69±0.08a	0.63±0.09a
	N240	1.39±0.30a	1.02±0.17a	0.72±0.11a	0.68±0.09a	0.61±0.08a

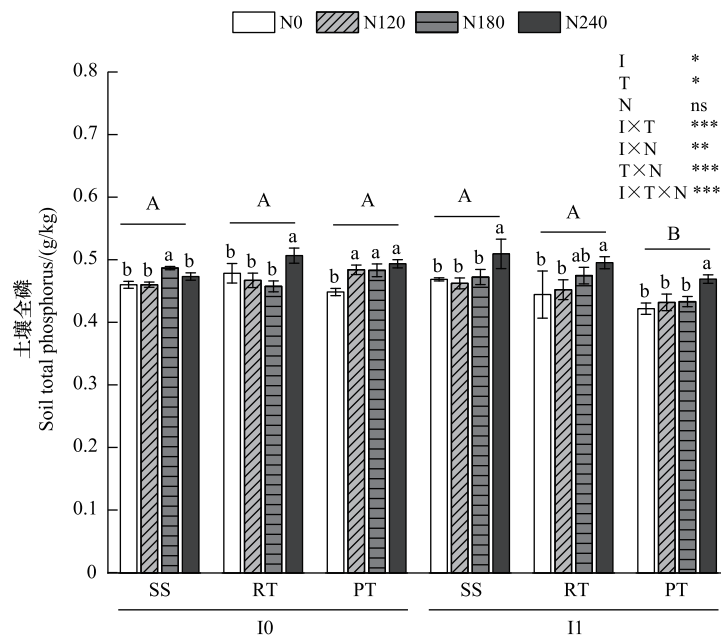


图 3 不同处理对 0—100 cm 土层整土全磷含量的影响

Fig.3 Effects of different treatments on soil total phosphorus contents in 0—100 cm

分析不同土层土壤 TP 含量(表 5)可知,与 I0 相比,I1 不影响上层(0—60 cm)土壤 TP 含量,但使 60—80 cm 和 80—100 cm 土层分别显著降低 8.8% 和 12.5%。耕作对土壤 TP 含量的影响在不同土层表现不同。土壤 TP 含量在 0—20 cm 土层,RT 较 SS 和 PT 分别显著提高 8.1% 和 5.3%;在 20—40 cm 土层,SS 较 RT 和 PT 分别显著提高 6.7% 和 9.1%;在 40—60 cm 土层,SS 和 RT 较 PT 分别显著提高 11.4% 和 8.6%;而在 60—100 cm 各土层,耕作对其无显著影响。施氮对于 5 个土层土壤 TP 含量均无显著影响。可见,一次灌溉会降低深层土壤 TP 含量,耕作会影响上层土壤 TP 含量,但施氮无作用。

表 5 不同处理对不同土层土壤 P 含量的影响/(g/kg)

Table 5 Effects of different treatments on soil phosphorus contents of different depths

处理 Treatment		土层 Soil depth				
		0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm	60—80 cm	80—100 cm
灌溉	I1	0.77±0.09a	0.46±0.05a	0.37±0.27a	0.34±0.03b	0.32±0.04b
Irrigation	I0	0.76±0.05a	0.45±0.04a	0.38±0.28a	0.37±0.03a	0.36±0.04a
耕作	PT	0.76±0.05b	0.44±0.04b	0.35±0.02b	0.35±0.05a	0.33±0.07a
Tillage	RT	0.80±0.06a	0.45±0.04b	0.38±0.02a	0.36±0.02a	0.34±0.03a
	SS	0.74±0.09b	0.48±0.05a	0.39±0.02a	0.36±0.02a	0.35±0.02a
施氮	N0	0.76±0.09a	0.48±0.05a	0.37±0.02a	0.35±0.02a	0.33±0.03a
Nitrogen application	N120	1.09±0.08a	0.43±0.03a	0.37±0.03a	0.35±0.05a	0.36±0.04a
	N180	1.27±0.04a	0.46±0.05a	0.37±0.03a	0.35±0.02a	0.33±0.03a
	N240	1.39±0.07a	0.47±0.03a	0.37±0.03a	0.37±0.04a	0.34±0.06a

2.4 灌溉、耕作和施氮对旱地农田土壤 C、N、P 化学计量比的影响

分析不同因素对 0—100 cm 土层整土 C、N、P 化学计量比(表 6)可知,除施氮对 C:N 和 C:P,耕作对 N:P,灌溉和施氮互作对 C:P 和 N:P 的影响效应不显著外,灌溉、耕作和施氮及其互作对旱地农田土壤 C:N、C:P 和 N:P 均有显著或极显著的影响。

表 6 灌溉、耕作和施氮对 0—100 cm 土层整土 C:N、C:P 和 N:P 的方差分析

Table 6 Analysis of variance (ANOVA) results of soil C:N, C:P, and N:P in 0—100 cm

变异来源 Source of variation	df	F		
		C:N	C:P	N:P
灌溉 Irrigation	1	6.43 *	17.89 ***	14.44 ***
耕作 Tillage	2	68.17 ***	47.30 ***	0.79ns
施氮 Nitrogen application	3	1.895ns	0.16ns	14.49 ***
I×T	2	42.87 ***	538.47 ***	28.45 ***
I×N	3	2.58ns	7.78 ***	1.19ns
T×N	6	10.47 ***	76.30 ***	5.39 ***
I×T×N	6	7.31 ***	52.03 ***	7.15 ***

ns 表示未达到显著差异; * 表示差异水平在 $P<0.05$ 达到显著; ** 表示差异水平在 $P<0.01$ 达到显著; *** 表示差异水平在 $P<0.001$ 达到显著; I:灌溉 irrigation; T:耕作 tillage; N:施氮 nitrogen application; C:N:碳氮比 carbon to nitrogen ratio; C:P:碳磷比 carbon to phosphorus ratio; N:P:氮磷比 nitrogen to phosphorus ratio

对于不同土层土壤 C:N(表 7),I1 较 I0 显著降低 0—100 cm 土层整土 C:N,但主要表现在 40 cm 以下土层。除 SS 和 RT 在 0—20 cm 土层的 C:N 显著高于 PT 外,耕作对旱地农田其余土层土壤 C:N 的影响均表现为 $SS>RT>PT(P<0.05)$ 。施氮对土壤 C:N 的影响仅表现在 0—20 cm 土层。就土壤 C:P 而言,与 I0 相比,I1 处理下整土及各土层均显著降低;除 20—40 cm 土层外,0—100 cm 土层整土及其他土层土壤 C:P 均表现为 $SS>RT>PT(P<0.05)$;但施氮对 0—100 cm 土层整土及各土层土壤 C:P 均无显著影响。就土壤 N:P 而言,I1 较 I0 使其在浅层(0—20 cm 和 20—40 cm)显著降低;耕作者在 0—100 cm 土层整土及各土层表现为无显著差异。0—100 cm 土层整土 N:P 随施氮量的增加表现为先增加后稳定的趋势,但施氮对各土层的影响表现略有不同。在 0—20 cm、20—40 cm 和 40—60 cm,土壤 N:P 均表现为随施氮量的增加先增加后平稳,而在 60—80 cm 和 80—100 cm 土层施氮对其无显著影响。由此可见,施氮对土壤 N:P 的提升效应因土层深度的增加而减小。

2.5 旱地农田土壤生态化学计量特征对灌溉、耕作和施氮的响应

相关性结果(表 8)表明,除 TC 与 N:P、TN 与 C:N 和 C:P、TP 与 C:P、C:N 与 N:P 间相关性未达显著水平外,土壤 TC、TN、TP 含量及其生态化学计量比之间均显著正相关,说明旱地麦田土壤养分和生态化学计量比

间具有较强的协同性。

表 7 不同处理对土壤 C、N 和 P 生态化学计量比的影响

Table 7 Effects of different treatments on soil carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometric ratios

指标 Indicator	处理 Treatment		土层 Soil depth					
			0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm	60—80 cm	80—100 cm	0—100 cm
C:N	灌溉	I1	18.95±3.61a	16.56±3.06a	14.42±4.32b	12.99±4.84b	11.56±5.11b	14.72±3.10b
		I0	17.05±3.82b	18.23±5.90a	20.57±7.72a	19.05±7.72a	16.22±7.12a	17.27±5.16a
	耕作	PT	15.50±3.63b	13.03±2.44c	10.88±2.59c	8.78±3.08c	7.93±3.24c	11.31±2.13c
		RT	19.17±3.40a	17.87±3.33b	18.96±6.19b	17.73±5.94b	13.33±4.59b	16.70±2.48b
		SS	19.33±3.22a	21.28±4.06a	22.64±5.30a	21.56±4.53a	20.41±4.55a	19.98±3.09a
	施氮	N0	21.32±2.68a	19.17±3.89a	18.03±4.74a	17.33±7.17a	14.52±5.93a	17.61±3.54a
		N120	19.10±3.79b	18.81±5.22a	17.42±7.70a	15.90±6.90a	14.72±7.84a	16.72±5.28a
		N180	16.19±2.60c	15.62±4.25a	16.52±6.91a	14.84±6.48a	12.59±5.42a	14.65±3.87a
		N240	15.40±2.95c	15.97±4.74a	18.00±8.36a	16.02±8.09a	13.73±7.23a	15.00±4.45a
C:P	灌溉	I1	25.11±3.86b	30.25±5.39b	26.59±8.43b	23.82±8.45b	19.65±6.88b	24.38±4.86b
		I0	28.90±5.33a	39.01±12.29a	39.74±14.98a	35.83±14.74a	28.77±13.1a	32.34±10.18a
	耕作	PT	22.10±1.38c	25.35±3.31b	20.52±3.52c	16.34±5.50c	14.60±7.34c	19.48±2.44c
		RT	28.06±3.55b	37.55±9.72a	35.16±14.07b	33.74±12.13b	23.11±7.06b	29.91±7.28b
		SS	30.86±4.56a	40.99±9.33a	43.81±9.25a	39.40±8.56a	34.93±8.93a	35.68±06.61a
	施氮	N0	26.47±4.00a	31.77±5.88a	30.70±8.61a	29.78±12.00a	23.38±9.60a	27.22±6.35a
		N120	27.23±6.23a	38.81±10.93a	33.00±14.01a	29.57±11.78a	24.41±12.76a	29.07±9.47a
		N180	27.14±4.95a	33.39±11.46a	33.49±15.59a	29.68±14.06a	23.88±11.13a	28.17±9.28a
		N240	27.17±4.95a	34.56±11.70a	35.47±16.29a	30.27±16.31a	25.18±12.75a	28.96±10.52a
N:P	灌溉	I1	1.36±0.29b	1.84±0.22b	1.86±0.29a	1.87±0.28a	1.79±0.33a	1.67±0.20b
		I0	1.74±0.32a	2.18±0.44a	1.94±0.27a	1.87±0.29a	1.74±0.32a	1.87±0.24a
	耕作	PT	1.49±0.30a	1.98±0.24a	1.92±0.25a	1.87±0.33a	1.80±0.40a	1.75±0.17a
		RT	1.53±0.40a	2.12±0.51a	1.82±0.31a	1.90±0.29a	1.77±0.25a	1.78±0.30a
		SS	1.64±0.36a	1.94±0.36a	1.96±0.29a	1.84±0.23a	1.72±0.32a	1.79±0.24a
	施氮	N0	1.26±0.22b	1.67±0.19b	1.71±0.20b	1.75±0.25a	1.64±0.31a	1.54±0.12c
		N120	1.44±0.24b	2.07±0.25a	1.92±0.25a	1.92±0.36a	1.68±0.25a	1.74±0.20b
		N180	1.69±0.28a	2.13±0.42a	1.99±0.30a	1.96±0.20a	1.90±0.23a	1.90±0.20a
		N240	1.81±0.38a	2.18±0.43a	1.99±0.30a	1.85±0.28a	1.84±0.43a	1.91±0.23a

表 8 土壤 TC、TN、TP 含量及其生态化学计量比间的相关性分析

Table 8 Correlation analysis of soil total carbon, total nitrogen, total phosphorus, and their stoichiometric ratios

	TC	TN	TP	C:N	C:P	N:P
TC	1					
TN	0.70 ***	1				
TP	0.65 ***	0.78 ***	1			
C:N	0.76 ***	0.09	0.19 *	1		
C:P	0.71 ***	0.16	-0.06	0.87 ***	1	
N:P	0.04	0.19 *	0.44 ***	-0.08	0.40 ***	1

***: $P < 0.001$; **: $P < 0.01$; *: $P < 0.05$; TC: 总碳 total carbon content; TN: 全氮 total nitrogen content; TP: 全磷 total phosphorus content

方差分解分析(图 4)发现,耕作对旱地土壤生态化学计量特征的影响最大,占总变差的 59%,其次是灌溉占 19%,施氮仅占 1%。进一步对不同灌溉处理下的耕作效应进行主成分分析(图 5)发现,在 I0 和 I1 下土壤生态化学计量特征在 PT、RT 和 SS 间均存在差异,且前两个主成分的累计贡献率均达 85%以上,能够解释较多的变异性。其中,I0 下,除土壤 TP 外,其他指标均与 PC1 主要相关,且均呈正相关关系。I1 下土壤 N:P 与

PC2 主要相关,其他指标均与 PC1 主要相关,并呈正相关。与 I0 相比,I1 下 PT、RT 和 SS 更向 PC1 集中,说明一次灌溉可以缩小不同耕作方式间旱地麦田土壤生态化学计量特征的差异。

3 讨论

3.1 灌溉、耕作和施氮对旱地农田土壤 TC、TN 和 TP 含量的影响

土壤 C、N 和 P 含量与土壤含水量存在较强的相关性^[41]。本研究条件下,灌溉能显著降低土壤 TC、TN 和 TP 含量(图 1—3),这主要是由两个方面原因造成的。一方面灌溉改善了土壤水分,使作物从土壤中吸收更多的 TC、TN 和 TP;另一方面,当土壤水分较为充足时,微生物活性较高,加快土壤有机质的矿化,增加土壤 TC 消耗^[42],且灌溉后可能会造成硝态氮淋洗^[34],降低土壤 TN 含量,这与郝海波等和俞华林等的研究结果一致^[30,43]。此外土壤 TC 含量的降幅会随土壤深度的增加而逐渐增大,这主要时由于灌溉降低土壤 TC 含量,但土壤表层的秸秆、枯落物及根系的分解仍会对其做相

应的补充,而随着土壤深度的增加,这些补充逐渐减少,因此导致降幅逐渐增大。然而土壤 TN 含量的降幅则随土壤深度的增加呈先减小后增加的趋势,其原因主要是小麦根系的 90% 分布在 0—60 cm 土层,灌溉后有利于该层土壤氮素的吸收^[44]。本研究还表明,耕作方式可不同程度的改变土壤 TC、TN 和 TP 含量。就土壤 TC 含量而言,SS 较 RT 和 PT 具有明显的提升作用。一方面,SS 能够改善土壤结构环境和微生物活性,加快秸秆、根系分泌物等外源碳的周转和腐解,有利于土壤有机碳的积累^[45—46]。另一方面,SS 能够降低土壤团聚体的周转速率,增加团聚体的稳定性,减弱土壤有机碳的矿化作用^[19,47]。然而,在 0—20 cm 土层中,SS 的土壤 TC 含量较 RT 并无显著差异,这主要是由于 RT 耕作深度较浅,还田的作物秸秆主要存在于 15 cm 土壤,促进

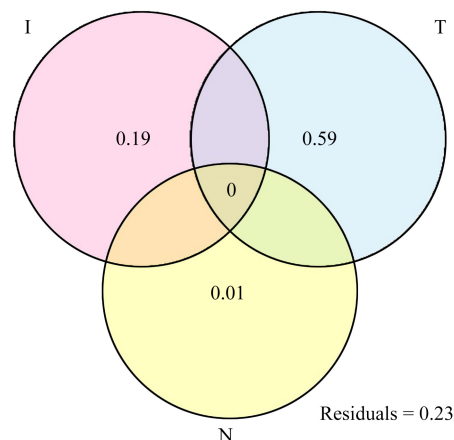


图 4 灌溉、耕作和施氮对土壤养分及其生态化学计量比的方差分解分析

Fig.4 Variation partitioning analysis (VPA) of soil nutrients and their stoichiometric ratios under irrigation (I), tillage (T), and nitrogen application (N) treatments

圈中的 R^2 值表示各个因素及交互作用的解释百分比,Residuals 表示不能解释的百分比, $P < 0.05$

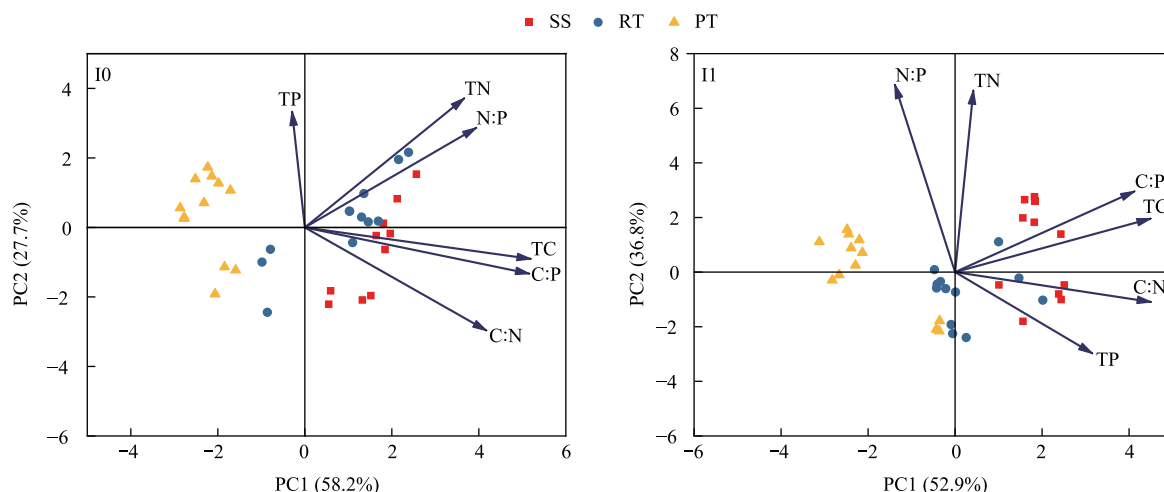


图 5 I0 和 I1 下耕作方式间土壤养分及其生态化学计量比的主成分分析

Fig.5 Principal component analysis (PCA) of different tillage related to soil nutrients and their stoichiometric ratios under I0 and I1

TC: 总碳; TN: 全氮; TP: 全磷; C:N: 碳氮比; C:P: 碳磷比; N:P: 氮磷比

了表层土壤 C 富集的缘故^[48]。对土壤 TN 而言,SS 在 40—60 cm 土层表现为显著提高,与其打破了犁底层,改善土壤较深层的通气条件,促进了土壤氮素矿化并向 40—60 cm 土层富集有关^[49],Huang 等^[50]也得到了类似的研究结果。耕作对土壤 TP 含量的影响整体上表现为 SS 和 RT 显著高于 PT,说明 PT 促进了土壤磷素消耗,但其原因尚不明确,有待进一步探讨。

目前关于施氮对土壤 C 含量的影响并无统一论。在黄土高原半干旱地区,施氮(210 kg/hm²)能够加速土壤有机质分解,降低土壤 C 含量^[51—52]。也有研究认为,施氮量在 135 kg/hm²时,能够增加作物生产力,增加枯落物、还田秸秆和根系分泌物的数量,进而提高麦田土壤 C 含量^[53]。武均^[54]在黄土高原的研究发现,当施氮量达到 210 kg/hm²时,土壤 C 库能够保持稳定或小有浮动。而在本研究中,施氮对土壤 TC 无显著影响,这可能是由于在旱地农田土壤中有有机质的矿化与施氮量无关^[51]。土壤 TP 含量主要受母质影响较大^[55],因此在本试验条件下,随施氮量的增加各土层土壤 TP 含量均无显著变化。然而,施氮是影响土壤 N 库或 TN 含量的重要因素,大量研究表明,0—20 cm 土壤 TN 含量随着施氮量的增加而上升^[56—57]。本研究表明,施氮对土壤 TN 含量的影响表现为随施氮量的增加呈先增加后稳定,且影响效应随土层增加逐渐降低的趋势(表 2),N240 和 N180 间无显著差异,说明施氮 180 kg/hm²即可维持旱地农田 TN 含量的稳定。这与李振强等^[57]发现的当施氮量在 150 kg/hm²以上时,土壤 TN 含量随施氮量的增加而逐渐增加的结果有出入,但与其发现的施氮仅对表层(0—20 cm)土壤氮含量有显著调控作用的结果一致。

3.2 灌溉、耕作和施氮对旱地农田土壤 C、N 和 P 生态化学计量比的影响

土壤 C、N 和 P 生态化学计量比是生态系统中生物地球化学循环过程和土壤功能的基础,更是反应土壤养分限制状况的重要指标^[58—59]。Cui 等^[60]认为高 C:N 或 C:P 可能导致土壤养分限制,进而产生作物和微生物之间的养分竞争,而低 C:N 或 C:P 会迫使微生物矿化形成更多的有机质来获得更多的 C,使其所在的生态系统达到生态化学计量平衡。当 N:P<10 时,作物生产力会受到 N 限制^[58]。而在过去的几十年中,大量的化肥投入导致农田土壤中养分元素不平衡^[61]。本研究中,不同处理下土壤 C:N 的平均值为 16.00,高于全国耕地 C:N(11.8)^[62],但是 C:P(28.4)和 N:P(1.8)远低于全国耕地水平(38.1 和 3.4),这说明与全国耕地土壤相比,本研究区土壤 N 含量较为匮乏,但 P 有效性较高。因此,如果不考虑气候和其他土壤性质,低背景值的 N 含量是本研究中旱地作物生长的最大限制。

灌溉能显著降低土壤 C:N 和 C:P,灌溉后土壤中的 TC 含量显著降低(图 1),且降幅远大于 TN 和 TP 含量,杨显梅^[10]也发现了类似的研究结果。这主要是由于当土壤水分较为充足时,有利于提高微生物活性,加快土壤有机质的矿化,增加土壤 C 的消耗,降低土壤 C:N 和 C:P。值得一提的是,本研究中一次灌溉虽降低了土壤 C:N,但仍高于全国耕作水平,说明一次灌溉后土壤仍是比较健康的。与 RT 和 PT 相比,SS 能够显著提高土壤 C:N 和 C:P,说明 SS 后土壤 TC 的积累要显著高于土壤 TN 和 TP。大量研究表明,SS 能够改善土壤 C 循环,促进土壤中的 C 积累^[46,63]。一方面,土壤 C:N 与土壤容重呈显著负相关^[64],SS 能够降低土壤容重,提高团聚体稳定性^[65];另一方面,SS 增加土壤通气性,好气性微生物能够加快土壤中枯落物和秸秆的腐解,形成大量腐殖质,进而提高了土壤 C 的固持能力^[66]。施氮使表层土壤 N:P 提高、C:N 降低,而在较深土层并无显著影响(表 7),说明施氮可以缓解作物氮限制,本结论与刘红梅等、黄菊莹等的研究结果一致^[67—68]。有研究发现,与土壤生态化学计量特征匹配的微生物群落可能会增加微生物活性^[52]。因此,在旱地农作区合理的栽培措施条件下保持土壤生态化学计量学的平衡有利于增加微生物资源的可利用性来缓解微生物资源的限制,进而改善土壤微生物群落和活性,保障土壤质量^[52, 61]。

3.3 灌溉、耕作和施氮对旱地农田土壤生态化学计量特征的综合影响

前人研究表明,土壤 TC、TN、TP、C:N、C:P 和 N:P 间存在显著的相关关系^[69—70]。本研究也表明,旱地农田生态系统中土壤生态化学计量特征是相互影响的(表 8),尤其是土壤 TC 和 TN 含量呈极显著正相关,说明土壤中 C 和 N 元素的周转过程具有高度相关的耦合性^[71]。我国农业农村部建议保持农田土壤 C:N 在 20—40 之间^[72],秸秆还田配合施氮已成为常见的栽培措施,用以保证土壤养分平衡^[73]。然而,本研究中方差分解

分析结果表明,耕作可解释 59%、灌溉可解释 19%,而施氮仅解释 1%(图 4),且一次灌溉条件下 SS 仍能保证土壤 C:N>20,说明可以通过灌溉和耕作调控旱地农田土壤生态化学计量特征,进而调控土壤质量,这与耕作方式和土壤水分是旱地农田土壤 C:N:P 生态化学计量特征的关键因素有关^[74]。由此可见,灌溉配合 SS 对调节土壤生态化学计量特征,保持土壤养分平衡有积极作用。研究表明,土壤特性与土壤生态化学计量特征密不可分^[75-76]。例如,土壤高含水量会导致土壤轻微酸化,刺激土壤中 N 等养分的矿化,最终改变土壤 C、N 和 P 生态化学计量比。同样,土壤容重对土壤生态化学计量特征具有重要影响。Ren 等^[18]的研究也表明,农田土壤生态化学计量特征主要受耕作方式的影响,且 SS 利于保持土壤 C、N 和 P 的平衡。因此,在旱地农作区建立合理的栽培措施可以改善土壤养分供应,维持土壤的健康与稳定。但灌溉、耕作和施氮对土壤 C:N、C:P 和 N:P 的影响是否具有普遍性,还需要在更多的土壤类型和种植区进一步探索。

4 结论

灌溉、耕作、施氮及其互作对旱地农田土壤生态化学计量特征表现出显著的调控效应。灌溉降低 0—100 cm 土层整土 TC、TN、TP 含量及其化学计量比,不利于土壤健康。深松能促进土壤养分积累,尤其是土壤 TC,是一种适用于旱地的耕作方式。施氮对表层土壤 TN 含量和 N:P 具有显著的调控效应,且随施氮量的增加呈现先增加后稳定的趋势,而对土壤 TC、TP、C:N 和 C:P 无显著影响,这说明适量施氮能够缓解旱地土壤养分限制。耕作和灌溉是影响土壤生态化学计量特征的主要驱动因素,分别占总变差的 59%和 19%,且灌溉可以缩小不同耕作方式间旱地麦田土壤生态化学计量特征的差异。由此可见,虽然灌溉降低了土壤 TC、TN 和 TP 含量及其化学计量比值,但其配合深松和施氮仍能够平衡土壤生态化学计量特征,增加土壤肥力和固碳潜力,有利于旱地农田可持续发展。因此,在旱地“一次灌溉”条件下,深松配施氮肥 180 kg/hm²是基于旱地麦田灌溉条件改善后保障土壤健康的最适农艺措施。本研究结果可增强对旱地农田土壤生态化学计量特征的认识,为提升旱地农田土壤肥力提供理论依据。

参考文献(References):

- [1] 刘展航,张树岩,侯玉平,朱书玉,王立冬,施欣悦,李培广,韩广轩,谢宝华. 互花米草入侵对黄河口湿地土壤碳氮磷及其生态化学计量特征的影响. 生态环境学报, 2022, 31(7): 1360-1369.
- [2] de Souza Oliveira Filho J, Vieira J N, Ribeiro da Silva E M, Beserra de Oliveira J G, Pereira M G, Brasileiro F G. Assessing the effects of 17 years of grazing exclusion in degraded semi-arid soils: evaluation of soil fertility, nutrients pools and stoichiometry. Journal of Arid Environments, 2019, 166: 1-10.
- [3] Xu X F, Thornton P, Post W. A global analysis of soil microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus in terrestrial ecosystems. Global Ecology and Biogeography, 2013, 22: 737-749.
- [4] Qiao Y, Wang J, Liu H M, Huang K, Yang Q S, Lu R L, Yan L M, Wang X H, Xia J Y. Depth-dependent soil C-N-P stoichiometry in a mature subtropical broadleaf forest. Geoderma, 2020, 370: 114357.
- [5] Delgado-Baquerizo M, Reich P B, Khachane A N, Campbell C D, Thomas N, Freitag T E, Abu Al-Soud W, Sørensen S, Bardgett R D, Singh B K. It is elemental: soil nutrient stoichiometry drives bacterial diversity. Environmental Microbiology, 2017, 19(3): 1176-1188.
- [6] Li J Y, Ren T B, Li Y S, Chen N, Yin Q Y, Li M S, Liu H B, Liu G S. Organic materials with high C/N ratio: more beneficial to soil improvement and soil health. Biotechnology Letters, 2022, 44(12): 1415-1429.
- [7] 曾冬萍,蒋利玲,曾从盛,王维奇,王纯. 生态化学计量学特征及其应用研究进展. 生态学报, 2013, 33(18): 5484-5492.
- [8] 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.
- [9] Wang G Y, Hu Y X, Liu Y X, Ahmad S, Zhou X B. Effects of Supplement Irrigation and Nitrogen Application Levels on Soil Carbon-Nitrogen Content and Yield of One-Year Double Cropping Maize in Subtropical Region. Water, 2021, 13(9): 1180.
- [10] 杨显梅. 水氮调控对春小麦氮素吸收及土壤碳氮磷化学计量特征的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2019.
- [11] 袁建钰,李广,闫丽娟,陈国鹏,张尚文,滕锐,卓玛草. 黄土高原不同灌水量下春小麦土壤与植物碳氮磷含量及其化学计量比特征. 草业科学, 2020, 37(9): 1803-1812.
- [12] 张恒嘉,黄高宝. 绿洲调亏灌溉春小麦农田生态化学计量特征. 中国生态农业学报, 2011, 19(1): 59-62.
- [13] Valkama E, Kunyapiyavea G, Zhapayev R, Karabayev M, Zhusupbekov E, Perego A, Schillaci C, Sacco D, Moretti B, Grignani C, Acutis M. Can conservation agriculture increase soil carbon sequestration? A modelling approach. Geoderma, 2020, 369: 114298.
- [14] Fiorini A, Boselli R, Maris S C, Santelli S, Ardeni F, Capra F, Tabaglio V. May conservation tillage enhance soil C and N accumulation without decreasing yield in intensive irrigated croplands? Results from an eight-year maize monoculture. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2020,

296; 106926.

- [15] Jha P, Hati K, Dalal R C, Dang Y P, Kopitke P M, Menzies N W. Soil carbon and nitrogen dynamics in a Vertisol following 50 years of no-tillage, crop stubble retention and nitrogen fertilization. *Geoderma*, 2020, 358(C): 113996.
- [16] Wang H, Wang S L, Yu Q, Zhang Y J, Wang R, Li J, Wang X L. No tillage increases soil organic carbon storage and decreases carbon dioxide emission in the crop residue-retained farming system. *Journal of Environmental Management*, 2020, 261: 110261.
- [17] 黄明, 吴金芝, 李友军, 王贺正, 付国占, 陈明灿, 李学来, 马俊利. 耕作方式和氮肥用量对旱地小麦产量、蛋白质含量和土壤硝态氮残留的影响. *中国农业科学*, 2021, 54(24): 5206-5219.
- [18] Ren Z J, Han X J, Feng H X, Wang L F, Ma G, Li J H, Lv J J, Tian W Z, He X H, Zhao Y N, Wang C Y. Long-term conservation tillage improves soil stoichiometry balance and crop productivity based on a 17-year experiment in a semi-arid area of Northern China. *The Science of the Total Environment*, 2024, 908: 168283.
- [19] 吴林甲, 祁琛, 闫秋艳, 闫双堆, 董飞, 张敏敏. 耕作方式对旱地麦田土壤团聚体及其碳氮组分分布的影响. *干旱地区农业研究*, 2023, 41(2): 193-200, 220.
- [20] 刘卫玲, 程思贤, 周金龙, 王川锋, 周亚男, 王群, 赵亚丽, 李潮海. 深松(耕)时机与方式对土壤物理性状和玉米产量的影响. *河南农业科学*, 2018, 47(3): 7-13.
- [21] Xu J, Han H, Ning T, Li Z, Lal R. Long-term effects of tillage and straw management on soil organic carbon, crop yield, and yield stability in a wheat-maize system. *Field Crop Research*, 2019, 233: 33-40.
- [22] Zhang X, Du H, Wang X, Li J. Effects of different tillage methods on soil organic carbon pool management index and its decomposition in weibei highland. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33: 2223-2237.
- [23] 吕薇, 李军, 岳志芳, 陈宁宁, 王淑兰. 轮耕对渭北旱塬麦田土壤有机质和全氮含量的影响. *中国农业科学*, 2015, 48(16): 3186-3200.
- [24] 张琦, 王淑兰, 王浩, 刘朋召, 王旭敏, 张元红, 李昊昱, 王瑞, 王小利, 李军. 深松与免耕频次对黄土旱塬春玉米田土壤团聚体与土壤碳库的影响. *中国农业科学*, 2020, 53(14): 2840-2851.
- [25] 李春越, 苗雨, 薛英龙, 张蓓蓓, 王益, 党廷辉, 张文婷, 常顺. 长期施肥黄土旱塬农田土壤-微生物-植物系统碳氮磷生态化学计量特征. *生态学报*, 2022, 42(1): 370-378.
- [26] Xu H W, Qu Q, Li P, Guo Z Q, Wulan E, Xue S. Stocks and stoichiometry of soil organic carbon, total nitrogen, and total phosphorus after vegetation restoration in the Loess Hilly Region, China. *Forests*, 2019, 10(1): 27.
- [27] 游惠明. 氮添加对秋茄植物-土壤-微生物碳氮化学计量学及其稳态特征的影响. *生态学杂志*, 2022, 41(10): 1909-1915.
- [28] 岳泽伟, 李向义, 李磊, 林丽莎, 刘波, 曾凡江. 氮添加对昆仑山高山草地土壤、微生物和植物生态化学计量特征的影响. *生态科学*, 2020, 39(3): 1-8.
- [29] Trost B, Ellmer F, Baumecker M, Meyer-Aurich A, Prochnow A, Drastig K. Effects of irrigation and nitrogen fertilizer on yield, carbon inputs from above ground harvest residues and soil organic carbon contents of a sandy soil in Germany. *Soil Use and Management*, 2014, 30(2): 209-218.
- [30] 郝海波, 许文霞, 侯振安. 水氮耦合对滴灌棉田土壤有机碳组分及酶活性的影响. *植物营养与肥料学报*, 2023, 29(5): 860-875.
- [31] 李彩霞, 陈津赛, 付媛媛, 韩其晟, 宁慧峰, 王广帅. 施氮和灌溉管理对麦田土壤团聚体组成及有机碳的影响. *灌溉排水学报*, 2022, 41(12): 59-64, 80.
- [32] 赵亚丽, 于淑婷, 穆心愿, 冀保毅, 郭海斌, 薛志伟, 李潮海. 深耕加秸秆还田下施氮量对土壤碳氮比、玉米产量及氮效率的影响. *河南农业科学*, 2016, 45(10): 50-54.
- [33] 赵凯男, 吴金芝, 黄明, 李友军, 汪洪涛, 黄修利, 吴姗姗, 张军, 赵志明, 赵雯馨, 李淑靖, 李爽, 李文娜. 返青后补灌与氮肥用量对旱地小麦产量及水氮利用效率的影响. *中国农业科学*, 2023, 56(17): 3383-3398.
- [34] Zhao K N, Wang H T, Wu J X, Liu A K, Huang X L, Li G Q, Wu S W, Zhang J, Zhang Z W, Hou Y Q, Zhao Z M, Li S, Guo J H, Zhao W, Li S J, Li W N, Huang M, Li Y J. One-off irrigation improves water and nitrogen use efficiency and productivity of wheat as mediated by nitrogen rate and tillage in drought-prone areas. *Field Crops Research*, 2023, 295: 108898.
- [35] 满建国, 于振文, 石玉, 张永丽. 不同土层测墒补灌对冬小麦耗水特性与光合速率和产量的影响. *应用生态学报*, 2015, 26(8): 2353-2361.
- [36] 彭亚敏, 武均, 蔡立群, 齐鹏, 张仁陟, 罗珠珠. 免耕及秸秆覆盖对春小麦-土壤碳氮磷生态化学计量特征的影响. *生态学杂志*, 2021, 40(4): 1062-1072.
- [37] Huang L, Hu H, Bao W K, Hu B, Liu J, Li F L. Shifting soil nutrient stoichiometry with soil of variable rock fragment contents and different vegetation types. *Catena*, 2023, 220: 106717.
- [38] 鲍士旦. 土壤化学分析. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [39] 王宪伟, 谭稳稳, 宋长春, 杜宇, 张豪, 陈宁. 大兴安岭北部多年冻土区河岸森林湿地土壤性质和微生物呼吸活性特征. *应用生态学报*, 2021, 32(12): 4237-4246.
- [40] Hu L, Ade L, Wu X, Wu X W, Zi H B, Luo X P, Wang C T. Changes in Soil C:N:P Stoichiometry and Microbial Structure along Soil Depth in Two Forest Soils. *Forests*, 2019, 10: 113.
- [41] 卜晓燕, 米文宝, 许浩, 张学艺, 米楠, 宋永永. 宁夏平原不同类型湿地土壤碳氮磷含量及其生态化学计量学特征. *浙江大学学报: 农业与生命科学版*, 2016, 42(1): 107-118.
- [42] Li J, Xie J C, Jiang R G. Brackish water irrigation on the characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus nutrients in the soil nearby crop roots. *Emirates Journal of Food and Agriculture*. 2018. 30(10): 863-872.
- [43] 俞华林, 张恩和, 王琦, 刘青林, 刘朝巍, 王田涛, 尹辉. 灌溉和施氮对免耕留茬春小麦农田土壤有机碳、全氮和籽粒产量的影响. *草业学报*, 2013, 22(3): 227-233.
- [44] 雒文鹤, 师祖姣, 王旭敏, 李军, 王瑞. 节水减氮对土壤硝态氮分布和冬小麦水氮利用效率的影响. *作物学报*, 2020, 46(6): 924-936.

- [45] 沈晓琳, 王丽丽, 汪洋, 王明亮, 杨殿林, 赵建宁, 李刚, 轩清霞, 王亮. 保护性耕作对土壤团聚体、微生物及线虫群落的影响研究进展. 农业资源与环境学报, 2020, 37(3): 361-370.
- [46] 高盼, 王宇先, 蔡姗姗, 徐莹莹, 杨慧莹, 王晨, 张巩亮. 玉米秸秆还田下深松年限对土壤有机碳含量及胡敏酸结构特征的影响. 干旱地区农业研究, 2024, 42(1): 205-213.
- [47] 隋鹏祥, 罗洋, 郑洪兵, 李瑞平, 王浩, 袁野, 郑金玉, 刘武仁. 长期耕作对农田黑土团聚体和有机碳稳定性的影响. 应用生态学报, 2023, 34(7): 1853-1861.
- [48] 潘孝晨. 不同耕作模式对双季稻田土壤碳氮循环微生物多样性的影响[D]. 长沙: 湖南大学, 2020.
- [49] 崔思远, 曹光乔, 朱新开. 耕作方式对稻麦轮作区土壤碳氮储量与层化率的影响. 农业机械学报, 2018, 49(11): 275-282.
- [50] Huang M, Zhou X F, Cao F B, Zou Y B. Long-term effect of no-tillage on soil organic carbon and nitrogen in an irrigated rice-based cropping system. Paddy and Water Environment, 2016, 14(2): 367-371.
- [51] Liu Q, Xu H W, Yi H J. Impact of fertilizer on crop yield and C:N:P stoichiometry in arid and semi-arid soil. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(8): 4341.
- [52] Song X, Liu X, Liang G, Li S, Li J, Zhang M, Zheng F, Ding W, Wu X, Wu H. Positive priming effect explained by microbial nitrogen mining and stoichiometric decomposition at different stages. Soil Biology Biochemistry, 2022, 175: 108852.
- [53] Li C X, Ma S C, Shao Y, Ma S T, Zhang L L. Effects of long-term organic fertilization on soil microbiologic characteristics, yield and sustainable production of winter wheat. Journal of Integrative Agriculture, 2018, 17(1): 210-219.
- [54] 武均. 不同管理措施下陇中黄土高原旱作农田土壤生态化学计量学特征研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2018.
- [55] 周正虎, 王传宽, 张全智. 土地利用变化对东北温带幼龄林土壤碳氮磷含量及其化学计量特征的影响. 生态学报, 2015, 35(20): 6694-6702.
- [56] 李玉东, 谭德水, 李子双, 李洪杰, 张灵菲, 马垒, 刘兆辉. 长期施用控释氮肥对潮土区麦-玉轮作作物产量的影响及土壤氮素供应特征研究. 山东农业科学, 2024, 56(1): 119-125.
- [57] 李振强, 范志懿, 杨荣, 马圆, 万仲武, 刘佳嘉. 氮肥施用量对灵武长枣果实品质及土壤氮含量的影响. 中国土壤与肥料, 2022(9): 1-7.
- [58] Güsewell S. N:P ratios in terrestrial plants: variation and functional significance. The New Phytologist, 2004, 164(2): 243-266.
- [59] Zhu Z K, Zhou J, Shahbaz M, Tang H M, Liu S L, Zhang W J, Yuan H Z, Zhou P, Alharbi H, Wu J S, Kuzyakov Y, Ge T D. Microorganisms maintain C:N stoichiometric balance by regulating the priming effect in long-term fertilized soils. Applied Soil Ecology, 2021, 167: 104033.
- [60] Cui Y X, Moorhead D L, Guo X B, Peng S S, Wang Y Q, Zhang X C, Fang L C. Stoichiometric models of microbial metabolic limitation in soil systems. Global Ecology and Biogeography, 2021, 30(11): 2297-2311.
- [61] Peñuelas J, Poulter B, Sardans J, Ciais P, van der Velde M, Bopp L, Boucher O, Godderis Y, Hinsinger P, Llusia J, Nardin E, Vicca S, Obersteiner M, Janssens I A. Human-induced nitrogen-phosphorus imbalances alter natural and managed ecosystems across the globe. Nature Communications, 2013, 4: 2934.
- [62] Guo X, Jiang Y F. Spatial characteristics of ecological stoichiometry and their driving factors in farmland soils in Poyang Lake Plain, Southeast China. Journal of Soils and Sediments, 2019, 19(1): 263-274.
- [63] 黄莹, 窦森, 高洪军, 董伟华. 不同深还秸秆用量对黑土腐殖质组成的影响. 吉林农业大学学报, 2020, 42(5): 545-551.
- [64] Benites V M, Machado P L O A, Fidalgo E C C, Coelho M R, Madari B E. Pedotransfer functions for estimating soil bulk density from existing soil survey reports in Brazil. Geoderma, 2007, 139(1/2): 90-97.
- [65] Temesgen M, Hoogmoed W B, Rockstrom J, Savenije H H G. Conservation tillage implements and systems for smallholder farmers in semi-arid Ethiopia. Soil and Tillage Research, 2009, 104(1): 185-191.
- [66] 王旭东, 张霞, 王彦丽, 李军. 不同耕作方式对黄土高原黑垆土有机碳库组成的影响. 农业机械学报, 2017, 48(11): 229-237.
- [67] 刘红梅, 李洁, 王丽丽, 赵建宁, 王慧, 杨殿林. 氮添加对贝加尔针茅草原植物和土壤化学计量特征的影响. 草业学报, 2018, 27(7): 25-35.
- [68] 黄菊莹, 余海龙, 王丽丽, 马凯博, 康扬眉, 杜雅仙. 不同氮磷比处理对甘草生长与生态化学计量特征的影响. 植物生态学报, 2017, 41(3): 325-336.
- [69] Singh G, Williard K W J, Schoonover J E. Cover crops and tillage influence on nitrogen dynamics in plant-soil-water pools. Soil Science Society of America Journal, 2018, 82(6): 1572-1582.
- [70] Liu X, Zhang W, Wu M, Ye Y Y, Wang K L, Li D J. Changes in soil nitrogen stocks following vegetation restoration in a typical Karst Catchment. Land Degradation & Development, 2019, 30(1): 60-72.
- [71] Hu B F, Xie M D, Li H Y, Zhao W R, Hu J, Jiang Y F, Ji W J, Li S, Hong Y S, Yang M H, Optiz T, Shi Z. Stoichiometry of soil carbon, nitrogen, and phosphorus in farmland soils in Southern China: spatial pattern and related dominants. Catena, 2022, 217: 106468.
- [72] 中华人民共和国农业农村部. 《2014 年耕地质量保护与提升技术模式》. 2014-8-18.
- [73] 倪国荣, 涂国全, 魏赛金, 吴建富, 石庆华, 潘晓华. 稻草还田配施催腐菌剂对晚稻根际土壤微生物与酶活性及产量的影响. 农业环境科学学报, 2012, 31(1): 149-154.
- [74] 王立革, 郭珺, 韩雄, 武爱莲, 王劲松, 董二伟, 南江宽, 焦晓燕. 不同灌溉方式下秸秆还田对设施土壤碳、氮及蔬菜产量的影响. 生态科学, 2018, 37(4): 45-51.
- [75] Zeraatpisheh M, Bakhshandeh E, Hosseini M, Alavi S M. Assessing the effects of deforestation and intensive agriculture on the soil quality through digital soil mapping. Geoderma, 2020, 363: 114139.
- [76] Hu B F, Zhou Q, He C Y, Duan L X, Li W Y, Zhang G L, Ji W J, Peng J, Xie H X. Spatial variability and potential controls of soil organic matter in the Eastern Dongting Lake Plain in Southern China. Journal of Soils and Sediments, 2021, 21(8): 2791-2804.