

江淮丘陵季节性干旱区灌溉与施氮量对土壤肥力和水稻水分利用效率的影响

肖新¹, 储祥林¹, 邓艳萍¹, 黄璐¹, 赵言文², 汪建飞¹

(1. 安徽科技学院城建与环境学院, 安徽凤阳 233100; 2. 南京农业大学资源与环境学院, 江苏南京 210095)

摘要: 采用防雨棚池栽试验, 研究灌溉模式和施氮量对水稻土壤肥力和水分利用效率的影响。结果表明, 灌溉模式与施氮量对土壤化学特性、土壤微生物学特性、产量及水分利用效率有着显著影响。与常规灌溉相比, 控制灌溉条件土壤有机质含量、全氮含量、全钾含量、速效磷含量、速效钾含量、细菌数量、真菌数量和水分利用效率增加, 碱解氮含量和放线菌数量降低。随着施氮量增加, 土壤有机质含量、全氮含量、碱解氮含量、放线菌和真菌数量增加, 而全磷含量、全钾含量、速效磷和速效钾含量降低, 产量和水分利用效率呈现先增加后降低的趋势。在本研究条件下, 以控制灌溉模式, 施氮量 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 产量达到 $11\,495 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 节本增效效应最佳。

关键词: 水稻; 灌溉模式; 施氮量; 水分利用效率; 土壤化学特性; 土壤微生物学特性

中图分类号: S274.1; S511 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2013)01-0084-05

Effects of irrigation and nitrogen fertilization on soil fertility and water use efficiency of rice

XIAO Xin¹, CHU Xiang-lin¹, DENG Yan-ping¹, HUANG Lu¹, ZHAO Yan-wen², WANG Jian-fei¹

(1. Anhui Science and Technology University, Fengyang, Anhui 233100, China;

2. Nanjing Agricultural University, Nanjing, Jiangsu 210095, China)

Abstract: The effects of irrigation and nitrogen (N) fertilization on soil fertility and water use efficiency (WUE) of rice were studied in an experiment of pool culture within rain-proof shelter. Samples were collected from treatments under control and conventional irrigation receiving N application of $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ and $270 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. The results showed that irrigation and nitrogen fertilization significantly influenced chemical and microbiological characteristics of soil, and yield and water use efficiency of rice. Compared with conventional irrigation, organic matter, total N, total P, total K, available P, available K, WUE, quantity of bacterium and quantity of fungus increased while available N and quantity of actinomycete decreased under control irrigation. With the increment of N application rates, organic matter, total N, available N, quantity of fungus, quantity of actinomycete increased, while total P, total K, available P, available K, quantity of bacterium decreased. However, yield and water use efficiency of rice reached the highest at $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ of N applied. It was concluded that control irrigation combined with suitable N application rate ($180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) could benefit rice production by reducing cost and gaining high yield.

Keywords: rice; irrigation; nitrogen application; water use efficiency; soil chemical characteristics; soil microbiological characteristics

水分和氮素合理配置是调控作物生长发育、提高作物产量、控制农业面源污染的重要措施^[1]。在节水灌溉条件下, 配合适量的养分, 能够有效提高自然降水和灌溉水的利用率^[2-5]。安徽省是我国水稻主产省份之一, 江淮丘陵地区单季稻占全省单季稻的一半以上, 是重要的水稻集中产区 and 商品粮基地。

该区属亚热带向暖温带过渡气候区, 适合单季中稻的生长, 但南北气流在此交汇, 造成自然降雨时空分布不均, 与蒸发量分布不同步, 常年约 50% 集中在 4—6 月, 夏秋之间高温少雨, 7—9 月蒸发量接近全年的一半, 常出现季节性干旱, 造成该区出现严重伏、秋干旱灾害, 加之丘陵地形地貌的复杂, 灌区工

收稿日期: 2012-06-20

基金项目: 安徽省青年科学基金项目(10040606Q12); 农业部公益性行业(农业)专项经费项目(201103004)

作者简介: 肖新(1980—), 男, 博士, 副教授, 主要从事环境生态与区域规划研究。E-mail: xiaoxin8088@126.com。

程老化及灌溉技术落后等原因,干旱胁迫仍然是制约本地区水稻稳产高产的瓶颈^[6-7]。与此同时,水稻生产中普遍存在沿袭常规施氮量和常规灌溉模式,导致水分利用效率低和氮肥过量施用的问题,是造成水稻产量和氮肥利用率低的主要原因^[7]。一直以来采用合适的稻田水分管理技术,以提高土壤肥力、提升水分利用效率与增加水稻产量是当前农业可持续发展中的一个重要问题。目前研究者对有关江淮丘陵地区提高化肥利用效率和旱涝灾害对策等方面作了较多的报道^[7-9],而关于灌溉与施氮量对土壤肥力和水稻水分利用效率的研究较少。因此,为改善农业生产季节性缺水状况,提高水资源和氮肥利用效率,减小旱灾造成的损失,提高稻米品质与产量,迫切需要开展稻基农田的氮素与水分高效利用研究。为此,本研究通过防雨棚池栽试验分析了节水灌溉和氮肥施用对稻田土壤肥力与水分利用效率的影响,旨在为江淮丘陵区典型季节性干旱区稻作持续稳产高产和高效利用水资源服务。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

试验于2009年与2010年在安徽省凤阳县安徽科技学院植物科技园进行。该区位于安徽省东北部,处于淮河中游南岸地区,属于北亚热带亚湿润季风气候,降水年度和季节分布极不均匀,常年约50%集中在4—6月,夏秋之交高温少雨,7—9月蒸发量接近全年的一半,常出现季节性干旱。供试土壤为黄棕壤,其基本理化性质为:pH值6.21,全氮含量 $1.41 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全磷含量 $1.84 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全钾 $6.99 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,有机质含量 $9.87 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱解氮含量 $68.10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷含量 $32.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾含量 $64.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

试验在防雨棚固定水泥试验池内进行,池深1.2 m,封底,各试验池之间用砖砌混凝土隔离,防止小区的水分交换。试验设置两种水分条件(C1—控制灌溉:返青期田间保持10~20 mm的水层,黄熟期自然落干,其它各生育期灌水后均不建立水层,土壤含水率上限为饱和含水率,分蘖前期、分蘖中期、分蘖后期、拔节孕穗期、抽穗扬花期、灌浆期和乳熟期的土壤含水率下限分别取饱和含水率的70%、65%、60%、80%、80%、80%和70%;C2—常规灌溉:灌溉制度参照当地农民的大田灌水,除分蘖末期晒田和黄熟期不建立水层外,各生育阶段保持浅水层10~60 cm。)和三个氮肥施水平(N1— $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、N2

— $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、N3— $270 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),共6个处理(即C1N1:采用控制灌溉和施氮水平 $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的处理;C1N2:采用控制灌溉和施氮水平 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的处理;C1N3:采用控制灌溉和施氮水平 $270 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的处理;C2N1:采用常规灌溉和施氮水平 $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的处理;C2N2:采用常规灌溉和施氮水平 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的处理;C2N3:采用常规灌溉和施氮水平 $270 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的处理),每个处理设3个重复,共计18个小区,随机区组排列,每个小区面积 3.75 m^2 ($3 \text{ m} \times 1.25 \text{ m}$)。

供试水稻品种为冈优527。6月8日移栽,10月8日收获。分蘖肥和穗肥分别于6月20日和7月16日撒施,氮肥施用量为基肥:分蘖肥:穗肥=5:2:3,氮、磷、钾肥料品种分别为尿素(含N46%)、过磷酸钙(含 P_2O_5 12%)和氯化钾(含 K_2O 60%),其中,过磷酸钙施用量为 $75 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,氯化钾施用量为 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。病虫害的防治及除草等栽培管理同当地大田水稻生产。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤化学性状 每个样区采5个土样(0~20 cm土层),采用“S”形取样法。土样采好后,带回实验室自然风干,过筛,待测。用重铬酸钾容量法—外加热法测有机质,用半微量开氏法测全氮,用NaOH熔融—钼锑抗比色法测全磷,用NaOH熔融—火焰光度法测全钾;用碱解扩散法测碱解氮,用Olsen法测定速效磷,用 NH_4OAc 浸提—火焰光度法测定速效钾^[10]。

1.3.2 土壤微生物学特性 首先将取土工具在采样点旁土壤中擦拭数次,然后除去土壤表面的枯叶,铲除表面1 cm左右的表土,以避免地面微生物与土样混杂,最后每个样区用5点取样法采0~10 cm表土,混匀过2 mm筛,当日测定,否则在4℃下保存,最迟不超过2 d。将新鲜土样研磨过1 mm筛,一部分土样测定土壤微生物数量,采用固体平板法进行分离测定,其中,细菌数量采用牛肉膏蛋白胨琼脂平板表面涂布法,真菌数量采用马丁氏(Martin)培养基平板表面涂布法,放线菌数量采用改良高氏一号合成培养基平板表面涂布法^[11-12]。

1.3.3 灌溉水量 灌溉水量采用水表测定。

1.3.4 需水量 本研究采用防雨棚池栽方式进行,试验小区四周及底部用混凝土浇筑,因此深层渗漏、降雨量、地表排水为0,则需水量仅需根据灌溉量和计算时段始末的水层或土壤水分含量进行计算。整个生育期内,每日8:00观测田面水层变化或土壤水分测墒仪(FDR)观测田间土壤水分变化。需水量计

算公式: $ET_m = I - \Delta W$, 式中, ET_m 为需水量(mm), I 为灌溉量(mm), ΔW 为水稻土体贮水量的变化。

1.3.5 产量及产量构成 小区产量, 成熟后考种, 实收各小区计算作物产量。

1.3.6 水分利用效率 $WUE = DW(Y)/ET_m$ 。式中, WUE 为水分利用率; $DW(Y)$ 为籽粒产量; ET_m 为需水量。

1.4 数据分析与处理

采用 Excel 2003 和 DPS 7.05 软件对数据进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 灌溉与施氮量对稻田土壤化学特性的影响

从表 1 可以看出, 各处理对土壤有机质含量影响达到显著差异, 其排列顺序依次为 C1N3 > C1N2 > C2N3 > C2N2 > C1N1 > C2N1。随着施氮量的增加, 土壤有机质含量增加, 与 C1N1 相比, C1N2、C1N3 的有机质含量分别增加了 10.28%、13.16%。与常规灌溉相比, 控制灌溉条件下土壤的有机质含量有增加趋势, 与 C2N1、C2N2、C2N3 相比, C1N1、C1N2、C1N3 的有机质含量相应提高了 15.01%、6.70%、8.05%。

表 1 不同处理对土壤化学性质的影响

Table 1 Effects of irrigation and nitrogen fertilization on soil chemical characteristics

处理 Treatment	有机质 Organic matter /(g·kg ⁻¹)	全氮 Total N /(g·kg ⁻¹)	全磷 Total P /(g·kg ⁻¹)	全钾 Total K /(g·kg ⁻¹)	碱解氮 Available N /(mg·kg ⁻¹)	速效磷 Available P /(mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available K /(mg·kg ⁻¹)
C1N1	8.66b	0.65d	1.07a	8.05a	76.51cd	31.92a	65.32a
C1N2	9.55ab	0.94b	1.02a	7.46ab	92.70b	31.24a	64.04ab
C1N3	9.80a	1.23a	0.97a	7.37ab	100.79a	29.64a	60.76b
C2N1	7.53c	0.52e	1.04a	7.07b	81.21c	30.94a	59.71bc
C2N2	8.95b	0.83c	1.01a	6.60c	95.73ab	30.10a	57.62bc
C2N3	9.07b	1.19a	0.93a	6.88bc	104.83a	29.62a	54.73c

注: 不同字母表示在 0.05 水平上差异显著, 下同。

Note: Different letters mean significant difference at $P < 0.05$ level, and they are the same as below.

上述分析结果表明, 氮肥施用与水分管理对土壤有机质含量、全氮含量、全钾含量、碱解氮含量、速效钾含量等化学特性指标产生了显著影响, 而对全磷与速效磷的影响未达到显著差异。氮肥的施用显著提高稻田土壤的有机质含量、全氮含量、碱解氮含量, 降低了稻田土壤的全钾和速效钾含量。与常规灌溉相比, 控制灌溉条件下, 稻田土壤的全氮含量、全钾含量与速效钾含量增加, 而碱解氮含量降低。

2.2 灌溉与施氮量对稻田土壤的微生物学特性的影响

从表 2 中可以看出, 不同处理对稻田土壤细菌

就土壤全 N、P、K 含量而言, 各处理对土壤全氮含量和全钾含量影响达到显著差异, 而对全磷的影响未达到显著差异(表 1)。随着施氮量的增加, 土壤全氮含量增加且差异显著, 而土壤全钾有所降低, 与 C1N1 相比, C1N2、C1N3 的全氮含量增加了 44.62%、89.23%, 全钾含量降低了 7.33%、8.45%。与常规灌溉相比, 控制灌溉下土壤的全氮含量和全钾增加, 如, 与 C2N1 相比, C1N1 的全氮含量和全钾含量分别提高了 25.00%、13.86%。

就土壤速效 N、P、K 含量而言, 不同的处理条件下, 土壤速效 N、P、K 含量影响有所不同, 其中对碱解氮含量和速效钾含量的影响达到显著差异(表 1)。而对速效磷的影响未达到显著差异。随着施氮量的增加, 土壤碱解氮含量显著增加, 与 C1N1 相比, C1N2、C1N3 的土壤碱解氮含量增加了 21.16%、31.73%; 而土壤速效钾的含量有所降低, 与 C1N1 相比, C1N2、C1N3 的速效钾含量降低了 1.96%、6.98%。与常规灌溉相比, 控制灌溉下土壤的碱解氮含量呈下降趋势, 而速效钾有增加趋势, 与 C2N1 相比, C1N1 的碱解氮含量下降了 5.79%, 速效钾提高 9.40%。

数量的影响达到了显著差异, 其排列顺序依次为 C1N1 > C1N2 > C2N1 > C2N2 > C1N3 > C2N3。随着施氮量的增加, 土壤细菌数量降低, 与 C1N1 相比, C1N2、C1N3 的细菌数量降低了 5.66% 和 30.52%。与常规灌溉相比, 控制灌溉下稻田土壤细菌数量增加, 与 C2N1 相比, C1N1 的土壤细菌数量增加了 20.98%。

不同处理对稻田土壤真菌数量的影响达到了显著差异(表 2), 其排列顺序为 C1N3 > C1N2 > C2N3 > C2N2 > C1N1 > C2N1。稻田土壤的真菌数量随着施氮量增加而增加, 与 C1N1 相比, C1N2、C1N3 的真菌

数量提高了 47.14% 和 76.56%。与常规灌溉相比,控制灌溉下稻田土壤的真菌数量增加,与 C2N1 相比,C1N1 的土壤真菌数量提高了 46.56%。

表 2 不同处理土壤微生物数量
Table 2 Effects of irrigation and nitrogen fertilization on soil microorganism

处理 Treatment	细菌 Quantity of bacterium ($\times 10^6$ g)	真菌 Quantity of fungus ($\times 10^4$ g)	放线菌 Quantity of actinomycete ($\times 10^5$ g)	三大菌总数 Total quantity ($\times 10^6$ g)
C1N1	8.65a	3.84d	3.12d	9.00a
C1N2	8.16a	5.65b	4.01bc	8.62a
C1N3	6.01c	6.78a	4.71ab	6.55c
C2N1	7.15b	2.62e	3.65c	7.54b
C2N2	6.89b	4.84c	4.62b	7.40b
C2N3	5.55c	5.58b	5.26a	6.13c

从表 2 中还可以看出,灌溉与施氮量对稻田土壤放线菌数量也达到显著差异,随着施氮量增加,土壤放线菌数量增加,与常规灌溉相比,控制灌溉抑制了放线菌的生长,数量有所降低。如,与 C1N1 相比,C1N2、C1N3 的放线菌数量提高了 28.53% 和 50.96%。与常规灌溉相比,控制灌溉下稻田土壤的放线菌数量降低,与 C2N1 相比,C1N1 的土壤放线菌数量降低了 14.52%。

就土壤微生物总量而言,当放线菌和真菌数量很低时,细菌数量变化成为影响微生物量变化的主因。本试验研究中的土壤中可培养的 3 大微生物数量所占比例为:细菌 90.54% ~ 96.11%,放线菌 3.47% ~ 8.58%,真菌比例最小,占 0.35% ~ 1.04% (表 2)。土壤微生物总量的变化趋势与细菌相似。

2.3 灌溉与施氮量对水稻产量和水分利用效率的影响

从表 3 可以看出,灌溉与施氮量对水稻产量的影响达到了显著差异。所有处理中,以 C2N2 处理产量最高,达 11 514 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,但与 C1N2 处理相比,未达到显著差异。随着施氮量增加,水稻产量呈现先增加后降低趋势,且差异显著。如,与 C1N1 处理相比,C1N2、C1N3 处理的产量分别提高了 24.45% 和 9.62%。

表 3 结果表明,各处理的水稻需水量达到显著差异,随着施氮量增加,水稻需水量呈现增加趋势,与 C1N1 处理相比,C1N2、C1N3 处理的需水量增加了 17.46% 和 26.23%;与常规灌溉相比,控制灌溉条件下,水稻的需水量显著降低,与 C2N1 处理相比,C1N1 处理的需水量降低了 26.00%。

表 3 不同处理对水稻产量构成和水分利用效率的影响
Table 3 Effects of irrigation and nitrogen fertilization on rice yield and WUE

处理 Treatment	产量 Yield ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	需水量 Water consumption ($\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$)	水分利用效率 WUE ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
C1N1	9237c	4542.7e	2.03ab
C1N2	11495a	5336.0d	2.15a
C1N3	10126bc	5734.4cd	1.77bc
C2N1	8701c	6138.6bc	1.42d
C2N2	11514a	6806.4ab	1.69c
C2N3	10275b	7035.5a	1.46d

灌溉与施氮量对水稻水分利用效率的影响也达到了显著差异(表 3)。随着施氮量增加,水稻水分利用效率呈现先增加后降低趋势,与 C1N1 处理相比,C1N2 处理的水分利用效率提高 5.91%,而 C1N3 处理的水分利用效率降低了 12.81%。相比常规灌溉模式而言,控制灌溉模式水分利用效率提高 21.23% ~ 42.96%。上述结果表明采用合理氮肥施用技术和节水灌溉技术能够有效提高水稻水肥利用效率,具有显著经济效益与生态效应。

3 讨论

1) 本文研究结果表明,在一定的范围内,增施氮肥有助于提升土壤有机质含量,这主要是由于增施氮肥可以促进农作物根系的迅速生长,从而提高根际有机物质的输入,同时,根系分泌物是作物向土壤输入有机 C 的重要途径,这与 Kuzyakov 等的研究是一致的^[13]。随着施氮量增加,土壤全氮含量、碱解氮含量提高,而土壤全磷、全钾、速效磷和速效钾含量降低。这说明增施氮肥有助于改善水稻根际的氮素营养,促进水稻生长,但通过植株带走了大量磷素与钾素^[14]。本研究中,控制灌溉有助于提升土壤有机质含量、全氮含量、全磷含量、全钾含量、速效磷与速效钾含量,这说明采用节水灌溉技术有效改善了土壤化学特性,而常规灌溉由于长期在淹灌条件,土壤的通透性降低,土壤水分渗漏强度增大,土壤养分易流失,致使土壤保肥供肥能力下降。与常规灌溉相比,控制灌溉下土壤的碱解氮含量有所降低,这可能与水层灌溉下水稻吸收 N 的速度较快,稻田厌气固氮菌增多,固氮量增加有关^[15]。

2) 在任何土壤中都以细菌数量最多,放线菌次之,真菌再次之,藻类、原生动物等依次排列,它们对

土壤中有机的分解、氮和磷等营养元素及其化合物的转化具有重要作用。本文研究表明,随着施氮量增加,土壤中细菌数量降低,真菌数量与放线菌数量提高,这说明较高含量的 N 肥在一定程度上抑制了细菌的生长,刺激真菌和放线菌的快速生长^[16],这可能是因为施用化肥促进植物生长,使根系发达,根系分泌大量低分子量有机物,这些分泌的有机物为根际土壤中微生物提供易于吸收利用的 C 源,从而促进土壤微生物生长,使土壤微生物活性及数量增加^[17],而又因为长期施用氮肥,磷、钾肥较少施入,成为限制因子而影响到土壤中微生物的数量即抑制了细菌的生长^[18]。与常规灌溉相比,采用控制灌溉模式有效增加了土壤中细菌数量和真菌数量,但降低了土壤中的放线菌的数量。究其原因,可能由于在水稻生育时期采用节水灌溉技术,实现了土壤水分轻度亏缺,这种轻度水分亏缺不仅可以提供生命所必需的水分,而且可以有效地改善土壤的通气状况,为细菌和真菌的生命活动提供了良好环境;但采取节水灌溉后,土壤的 pH 值升高,不利于放线菌生长,致使放线菌数量下降。

3) 本研究结果表明,在相同的农艺技术和气象因素条件下,与常规灌溉模式相比,控制灌溉的需水量降低了 18.49% ~ 26.00%,水分利用效率提高了 21.23% ~ 42.96%,产量有所降低,但均未达到显著差异。随着施氮量增加,产量呈现先增加后降低的趋势,施氮量越高,氮素利用率越低,增加施氮量对产量的增加无益^[19],因此水稻高效栽培要尽量减少无效生长量,提高氮素利用效率,降低因过量施用氮肥产生农业面源污染风险。已有研究表明,施氮量与灌溉量有显著的互补效应,尤其在季节性干旱地区,提高水分和氮肥的利用效率,实现了“以肥补水”与“水肥耦合”^[20]。在本试验条件下,以 C1N2 处理水氮耦合效应最佳,产量最高,达 11 495 kg·hm⁻²,水肥耦合效应显著。

参考文献:

- [1] 山 仑,张岁岐.能否实现大量节约灌溉用水?——我国节水农业现状与展望[J].自然杂志,2006,28(2):71-74.
- [2] 张建军,王 勇,唐小明,等.陇东黄土高原不同耕作方式及施肥处理对冬小麦产量和土壤肥力的影响[J].干旱地区农业研究,2010,28(1):247-254.
- [3] 邵国庆,李增嘉,宁堂原,等.灌溉和尿素类型对玉米水分利用效率的影响[J].农业工程学报,2010,26(3):58-63.
- [4] Zand - Parsa Sh, Sepaskhah A R, Ronaghi A. Development and evaluation of integrated water and nitrogen model for maize[J]. Agricultural Water Management, 2006, 81(3):227-256.
- [5] Kirda C, Topcu S, Kaman H, et al. Grain yield response and N-fertilizer recovery of maize under deficit irrigation[J]. Field Crops Research, 2005, 93(2/3):132-141.
- [6] Xiao X, Zhao Y W, Hu F. The comparison on the function of different water-saving rice cultivation ecosystems in seasonal drought hilly region of southern China[J]. Journal of Sustainable Agriculture, 2008, 32(3):463-482.
- [7] 黄义德,武立权,黄雅丽.安徽省江淮丘陵地区单季中稻旱灾原因浅析及对策[J].安徽农业科学,2005,33(12):2223-2224.
- [8] 张祥明,郭熙盛,武 际,等.江淮地区稻田基础土壤肥力与水稻合理施用技术研究[J].中国农学通报,2009,25(15):131-135.
- [9] 黄淑玲,方 刚,袁新田,等.水土流失成因分析与治理措施——以安徽江淮丘陵地区为例[J].广东农业科学,2010,(2):147-153.
- [10] 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,2000:20-131.
- [11] 关松荫.土壤酶及其研究法[M].北京:农业出版社,1986:278-313.
- [12] 许光辉,郑洪元.土壤微生物分析方法手册[M].北京:农业出版社,1986.
- [13] Kuzyakov Y, Friedel J K, Stahr K. Review of mechanisms and quantification of priming effects[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32:1485-1498.
- [14] 詹其厚,陈 杰.基于长期定位试验的变性土养分持续供给能力和作物响应研究[J].土壤学报,2006,43(1):124-132.
- [15] 李世清,任书杰,李生秀.土壤微生物体氮的季节性变化及其与土壤水分和温度的关系[J].植物营养与肥料学报,2004,10(1):18-23.
- [16] 龚 伟,颜晓元,王景燕.长期施肥对土壤肥力的影响[J].土壤,2011,43(3):336-342.
- [17] 乔云发,苗淑杰,韩晓增.长期施肥条件下黑土有机碳和氮的动态变化[J].土壤通报,2008,39(3):545-548.
- [18] 李秀英,赵秉强,李絮花,等.不同施肥制度对土壤微生物的影响及其与土壤肥力的关系[J].中国农业科学,2005,38(8):1591-1599.
- [19] 刘彩玲,杨松楠,隋 标,等.太湖流域水稻最佳养分管理研究[J].南京农业大学学报,2011,34(4):71-76.
- [20] 李 磐,吉恒莹,马兴旺,等.新疆干旱区长绒棉水肥耦合产量效应研究[J].干旱地区农业研究,2010,28(6):103-107.