

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2013.01.013

再生水滴灌土壤中氮素的动态变化规律

裴亮¹,张体彬¹,梁晶²,刘慧明³

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室,北京 100101;
2. 水利部综合事业局新华公司,北京 100053; 3. 环境保护部卫星环境应用中心,北京 100094)

摘要:采用大田试验方法,以地下水滴灌为对照,分析研究再生水滴灌后土壤中氮素的动态变化规律。结果表明:相对于地下水滴灌,再生水滴灌后初期土壤表层的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量比大幅度增加,但从灌后第5天开始显著降低,于灌后第9天降到灌前水平,且在各土层分布均一,无明显的向下淋洗趋势。再生水滴灌处理下各土层土壤中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的质量比普遍高于对照。各处理土壤中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的质量比沿剖面变化趋势一致,即从表层到底层 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 质量比逐渐增加,说明 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 有明显向下淋洗的趋势。但在100~150 cm深度处, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 质量比开始降低。采用再生水滴灌种植黄瓜,生长季末停止灌水后不同深度处(0~50 cm, 50~100 cm, 100~150 cm, 150~200 cm)土壤中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的质量比较生长季初分别增加38.20%, 44.67%, 34.94%和30.88%。

关键词:再生水滴灌;土壤含氮量;硝态氮;铵态氮

中图分类号:X703.1;S607⁺.1 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2013)01-0070-05

Dynamic variation of nitrogen in soil under reclaimed water drip irrigation

PEI Liang¹, ZHANG Tibin¹, LIANG Jing², LIU Huiming³

(1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;
2. Xinhua Corporation, Bureau of Comprehensive Development, Ministry of Water Resources, Beijing 100053, China;
3. Satellite Environment Center, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100094, China)

Abstract: The dynamic variation of nitrogen in soil under reclaimed water drip irrigation was studied through field experiments and compared with that under groundwater drip irrigation. The results show that the $\text{NH}_4^+\text{-N}$ content in the surface layer increased sharply in the initial period after the reclaimed water drip irrigation, compared with the groundwater drip irrigation, then decreased significantly on the fifth day, and finally decreased to the level before irrigation on the ninth day. The $\text{NH}_4^+\text{-N}$ content was uniform in all soil layers, showing no tendency of downward leaching. The $\text{NO}_3^-\text{-N}$ content in all soil layers under reclaimed water drip irrigation was higher than that under groundwater drip irrigation. The $\text{NO}_3^-\text{-N}$ content in soils under different treatments showed almost the same trend in soil profiles; it increased with the soil depth, indicating an obvious tendency of downward leaching. However, at a depth of 100 to 150 cm, the $\text{NO}_3^-\text{-N}$ content began to decrease. The reclaimed water drip irrigation was applied to cucumber planting. It was found that the $\text{NO}_3^-\text{-N}$ content at depths of 0 to 50 cm, 50 to 100 cm, 100 to 150 cm, and 150 to 200 cm at the end of the growth season increased by 38.20%, 44.67%, 34.94%, and 30.88%, respectively, compared to that in the early stage of the growth season.

Key words: reclaimed water drip irrigation; nitrogen content in soil; $\text{NO}_3^-\text{-N}$; $\text{NH}_4^+\text{-N}$

收稿日期: 2012-08-21
基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(51109197);中国科学院西部行动计划(KZCX2-XB2-13);中国科学院知识创新工程项目(KSCX2-YW-N-080)
作者简介: 裴亮(1982—),男,江苏南京人,助理研究员,博士,主要从事农业水资源高效利用研究。E-mail: pellys_0311@163.com
通信作者: 张体彬, E-mail: zhangtibin@163.com

再生水是指对污水处理厂出水、工业排水、生活污水等非传统水源进行回收,经适当处理后达到一定水质标准,并在一定范围内重复利用的水资源。再生水的利用是国内外有效缓解农业用水紧张的重要举措之一,也是污水资源化利用、减轻污水排放二次污染的环保发展趋势,已在很多发达国家得到广泛推广^[1-2]。

再生水灌溉一方面能减少污水直接灌溉所引起的严重的面源污染问题,并为植物生长提供重要的养分,促进植物生长发育和提高产量^[3];另一方面,再生水中过量的养分、有毒化学物质和病原体同时输入环境生态系统,会造成一定程度的环境污染^[4],有可能危害环境和人类健康。氮素作为生命体的重要组成元素,是引起水体污染、水体富营养化的主要因素^[5]。同时大量农业氮肥的施用以及生活污水的肆意排放等人类活动,使土壤中存在大量的未被作物吸收利用的氮素以 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 的形式经挥发、淋洗、径流等途径损失,对环境产生了现实和潜在的污染^[6-7]。因此,研究土壤中氮素,尤其是 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 的动态变化,对预测和控制农业面源污染具有重要的理论价值和指导意义。

此外,滴灌对灌水时间、灌水量和土壤湿润范围高度控制的特点,使其可以根据土壤物理性质、作物根系分布和作物耗水量来调节土壤的水分和养分^[8],在保证作物达到优质高产的同时减少农业面源污染。利用滴灌技术进行农村生活污水再生利用可以提高再生水中氮、磷等养分的利用效率,在节肥、节水、增产的同时减少污染物输入环境生态系统,对缓解我国水资源危机、防治农业面源污染和促进循环经济发展具有重要意义^[9-10]。本试验在其他条件相同的情况下,研究比较不同比例的再生水与地下水滴灌后土壤中氮素的动态变化规律。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

研究区为中国科学院地理科学与资源研究所和国务院南水北调办公室政策及技术研究中心共同建立的“南水北调中线水源区农业面源污染控制综合示范区”,地处湖北省十堰市茅箭区南部山区,属北亚热带季风气候区,四季分明、冬长夏短,春季升温迅速,秋雨连绵,冬季少雨雪、少严寒。年平均日照时数达 1 925.8 h;多年平均气温 15.3℃,极端最低气温-14.9℃,极端最高气温 41℃。全年大于或等于 10℃的积温为 4 936.5℃;全年无霜期 246 d;多年平均降水量 855 mm,降雨量年际变化大,汛期(5 月 1 日至 10 月 20 日)降雨量占年降雨量的 58%~62%,且强度大、历时短、入渗有限,容易冲刷侵蚀地表。研究区试验土壤为黄棕壤土,密度在 1.56~1.71 g/cm³ 之间。

1.2 试验布置

试验在 2011 年黄瓜生长季(9 月 20 日至 12 月 10 日)内的 1 个灌水周期进行。黄瓜的栽培方式采用垄作,垄肩宽 60 cm,两垄中心间距 140 cm,垄高 15 cm,垄上种植 2 行,株距 40 cm。在黄瓜种植前,施磷酸二铵复合肥 300 kg/hm²。试验设 3 个灌溉水质处理,分别标记为 T1(全部再生水灌溉)、T2(再生水和地下水联合灌溉,其中再生水占总灌水量的 50%,即灌溉用水由再生水和地下水按照 1:1 比例配制)和 C(全部地下水灌溉)。每个处理含 3 个重复小区,每个小区面积为 4 m×4 m,包括 3 条垄。灌溉采用重力滴灌的方式进行,每个处理由 1 个蓄水桶(容积 240 L)供水,水桶放置在距地面约 1.2 m 高的位置,每次灌水前按照比例将再生水和地下水分别添加到蓄水桶中。每垄中心铺设 1 条滴灌带,滴头间距为 20 cm(与株距相等),滴头流速为 2.7 L/h,即每株黄瓜根部均有 1 个滴头供水。每个处理的第 2 个试验小区内,在滴头下 20 cm 深度处安装 1 组负压计,根据其他类似蔬菜作物滴灌灌溉制度^[11-12]制定灌溉计划,当负压计指示的土壤水势低于-25 kPa 时进行灌溉,每次灌水量为 5 mm。生育期内共灌水 7 次。整个黄瓜生育期内共降雨 84 mm。

此外,农村生活污水经过土壤过滤处理技术处理后得到试验用的再生水。土壤过滤处理技术主要由布水系统、复合填料土壤层、集水系统 3 部分组成。农村生活污水从化粪池经潜污泵提升进入调节池,经过均匀水质水量和初级厌氧处理,去除大部分颗粒悬浮物。而后,污水经布水系统被均匀分配到复合填料土壤层,由于土壤的物理吸附、微生物降解、植物根系吸收等综合作用得到净化;净化后的出水由集水系统收集,自流进入集水井,经消毒后得到再生水,用于灌溉。地下水、生活污水及再生水水质见表 1。由表 1 可以看出,简单的多层土壤渗滤系统对生活污水处理效果一般,再生水中仍有部分指标的上限略微超过了国家标准限值。

表1 灌溉水质及其与国家相关标准之间的比较

Table 1 Irrigation water quality and its comparison with national irrigation standards

测定项目	$\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\rho(\text{NH}_4^+\text{-N})/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	浊度/ NTU	$\rho(\text{SS})/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	温度/ $^{\circ}\text{C}$	pH	$\rho(\text{BOD}_5)/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\rho(\text{DO})/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\rho(\text{TN})/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\rho(\text{TP})/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
地下水	3.21 ~ 5.83	0.08 ~ 0.17	0.4 ~ 2.0	2 ~ 10	10 ~ 20	7 ~ 8	1.2 ~ 2.33	0.2 ~ 1.4	0.99 ~ 2.03	0.08 ~ 0.22
生活污水	450 ~ 730	73 ~ 108	20 ~ 113	60 ~ 190	14 ~ 38	6 ~ 9	179 ~ 271	2.9 ~ 5.7	53 ~ 79	4.9 ~ 10.4
再生水	68 ~ 112	14 ~ 29	21 ~ 98	30 ~ 60	14 ~ 38	6 ~ 9	28 ~ 47	2.0 ~ 4.8	17 ~ 37	4.1 ~ 9.3
蔬菜灌溉用水 ^[13]	100			60		6 ~ 9	40	≥ 0.5	≤ 30	≤ 30

1.3 测定项目及方法

试验选择在黄瓜生长季生育期内(10月7日)的1个灌水周期内进行。此次灌溉是全生育期的第3次灌溉,正处于黄瓜营养生长的旺盛期。分别于灌前(0 d)和灌后第2天、第5天、第9天取土。取样深度为0~10 cm,10~20 cm,20~40 cm,40~60 cm,60~90 cm,90~100 cm。试验期间,灌后第3天、第4天和第5天分别降雨1.2 mm,3.4 mm和1.0 mm。土壤经风干过筛后, NO_3^- -N的质量比采用1 mol/L KCl 浸提-流动分析仪测定, NH_4^+ -N的质量比采用2% K_2SO_4 浸提-流动分析仪测定。

2 结果分析

2.1 再生水滴灌后土壤中 NH_4^+ -N 的动态变化

图1为不同处理下土壤中的 NH_4^+ -N 质量比在1个灌水周期内的动态变化。从图1可以看出,土壤中 NH_4^+ -N 质量比的变化在灌后初期受灌溉的影响较大。在灌后第2天,T1和T2处理下土壤中 NH_4^+ -N 质量比增加,特别是表层土壤中的 NH_4^+ -N 质量比一直处于较高水平。处理之间比较发现,灌后第2天,T1处理下不同土层土壤中的 NH_4^+ -N 质量比达到C处理的1.2~3.7倍。灌后第5天,土壤中的 NH_4^+ -N 质量比开始降低;在灌后第9天,各处理下不同土层土壤中的 NH_4^+ -N 质量比均降到近似灌水前的水平,且在各土层中分布均一,没有表现出随水向下淋洗的效果,这可能是由于铵态氮盐容易吸附于土壤颗粒上,从而导致其在水中的溶解度很小^[14]。由于地下水中 NH_4^+ -N 的质量比极低,所以地下水灌溉后土壤剖面中 NH_4^+ -N 的质量比变化幅度较小,表层仅出现少量 NH_4^+ -N 积累。至于地下水灌溉后土壤中 NH_4^+ -N 略微积累的原因,可能是土壤含水量增加改变了土壤中氮素的矿化速率和 NH_4^+ -N 的硝化速率,具体表现为灌水后较大的土壤湿度在抑制 NH_4^+ -N 硝化作用的同时却给土壤氮素的矿化提供了有利条件,矿化速率此时可能显著大于 NH_4^+ -N 的硝化速率,造成 NH_4^+ -N 的短时积累。

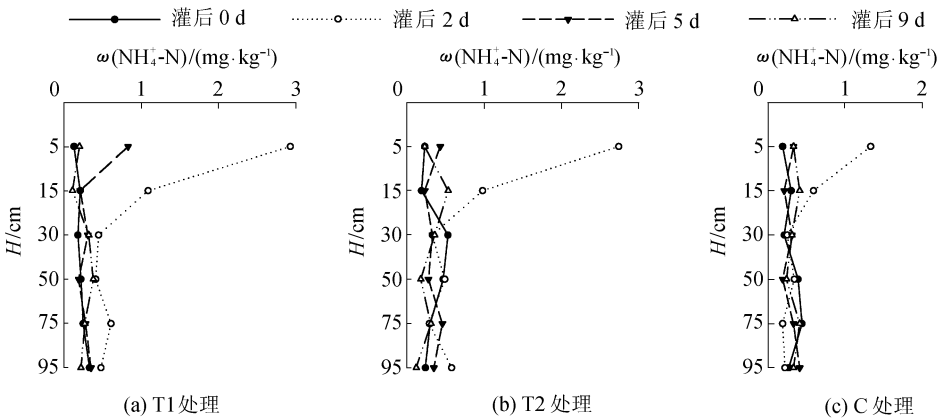


图1 不同处理下土壤 NH_4^+ -N 质量比随深度的变化

Fig. 1 NH_4^+ -N content variation with depth in soils under different treatments

2.2 再生水滴灌后土壤中 NO_3^- -N 的动态变化

图2为不同处理下土壤中 NO_3^- -N 质量比在不同灌水时间下的动态变化。从图2可以看出,不同处理土壤中 NO_3^- -N 质量比沿剖面的变化趋势一致,从表层到底层 NO_3^- -N 质量比逐渐增加。灌后第2天,底层 NO_3^- -N 质量比增加明显。各处理之间比较,发现灌后第2天 T1 处理表层土壤中 NO_3^- -N 质量比达到

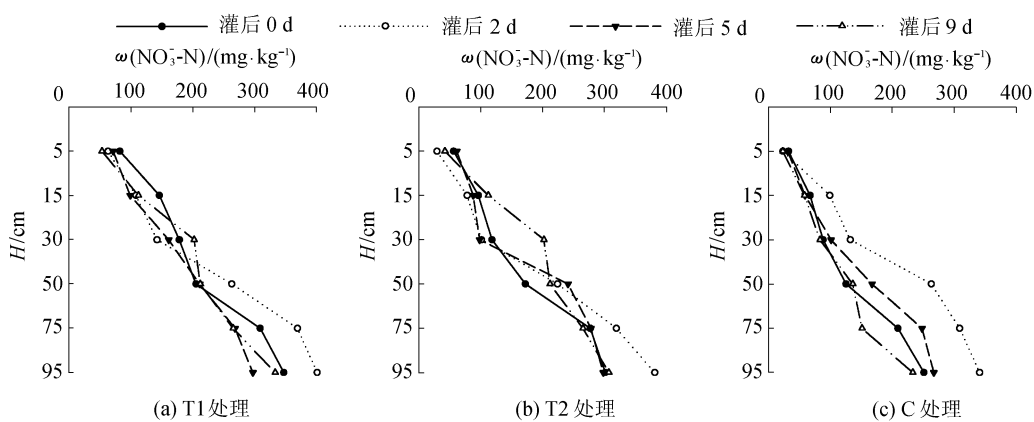


图 2 不同处理下土壤 NO₃-N 质量比随深度的变化

Fig. 2 NO₃-N content variation with depth in soils under different treatments

63.0 mg/kg,为同时期 C 处理的 2.7 倍,而下层土壤中 NO₃-N 质量比亦分别比 C 处理高 10% ~ 20%。灌后第 5 天土壤中 NO₃-N 质量比开始降低,第 9 天降至灌水前的水平。

以上结果表明,0 ~ 100 cm 土壤中的 NO₃-N 质量比随深度逐渐增大。因此,选择全部再生水灌溉的 T1 处理和全部地下水灌溉的 C 处理,对比 0 ~ 200 cm 深度土层的 NO₃-N 质量比在黄瓜生长季初灌水前和生长季末灌水结束后的变化情况,每 50 cm 混合测定 1 次,结果见图 3。总体来看,土壤中 NO₃-N 质量比随深度增加呈现先升高、后降低趋势,即 100 cm 以下土层中的 NO₃-N 质量比逐渐降低。不同处理的具体表现不同。C 处理下除表层土壤中 NO₃-N 质量比略有降低,其他土层内和生长季初变化不大。而 T1 处理下,黄瓜生长季末灌水结束后 0 ~ 50 cm,50 ~ 100 cm,100 ~ 150 cm 和 150 ~ 200 cm 土壤中的 NO₃-N 质量比,比其生长季初分别增加 38.20% ,44.67% ,34.94% 和 30.88% 。

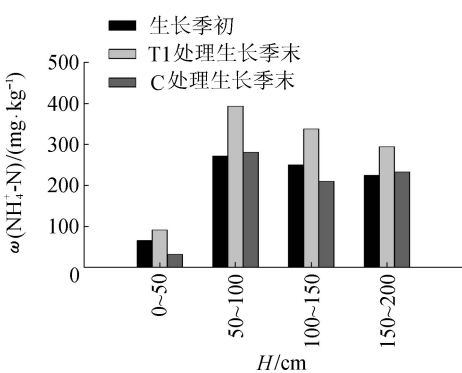


图 3 不同深度土层中 NO₃-N 质量比

Fig. 3 NO₃-N content in different soil layers

3 结 论

本次试验中,再生水滴灌后土壤中的 NH₄⁺-N 质量比高于地下水滴灌处理,特别是表层土壤中 NH₄⁺-N 质量比急剧增加,但在灌后第 5 天明显降低,第 9 天降低至最初水平,且各土层较均匀,无明显向下淋洗的趋势。再生水滴灌下的土壤 NO₃-N 质量比亦高于对照处理,但各处理土壤中 NO₃-N 质量比沿剖面变化趋势一致,即从表层到底层土壤中 NO₃-N 质量比逐渐增加,说明 NO₃-N 有明显向下淋洗的趋势。但在 100 ~ 150 cm 深度处,NO₃-N 质量比开始降低。采用再生水滴灌种植黄瓜,生长季末停止灌水后 0 ~ 200 cm 土壤中 NO₃-N 质量比较生长季初显著增加,说明再生水滴灌条件下 NO₃-N 在土壤中有一定的富集。当再生水中污染物浓度大时,势必会有一定量的污染物淋失进入地下水系统,并对土壤环境和植物的生长发育及产量产生负面影响^[10,15],但其影响程度和时效还需通过长期试验做进一步的观察和研究。

参考文献:

[1] 焦志华,黄占斌,李勇,等. 再生水灌溉对土壤性能和土壤微生物的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(2): 319-323. (JIAO Zhihua, HUANG Zhanbin, LI Yong, et al. The effect of reclaimed water irrigation on soil performance and the microorganism[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, 29(2): 319-323. (in Chinese))

[2] 裴亮,刘慧明,王理明. 农业再生水灌溉现状及发展对策分析[J]. 生态经济, 2012(1): 152-155. (PEI Liang, LIU Huiming, WANG Liming. Analysis on constructive and development countermeasure of agricultural irrigation with reclaimed water[J]. Ecological Economy, 2012(1): 152-155. (in Chinese))

- [3] 裴亮, 颜明, 陈永莲, 等. 再生水灌溉环境生态效应研究进展[J]. 水资源与水工程学报, 2012, 23(3): 15-21. (PEI Liang, YAN Ming, CHEN Yonglian, et al. Research progress on environmental and ecological effects of reclaimed water irrigation[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2012, 23(3): 15-21. (in Chinese))
- [4] ORON G, CAMPOS C, GILLERMAN L, et al. Wastewater treatment, renovation and reuse for agricultural irrigation in small communities[J]. Agricultural Water Management, 1999, 38: 223-234.
- [5] 王世岩, 刘晓波, 刘畅. 洱海表层水体中氮素空间变异分析[J]. 水资源保护, 2010, 26(6): 37-41. (WANG Shiyao, LIU Xiaobo, LIU Chang. Analysis on spatial variation of nitrogen in top layer water of Erhai Lake[J]. Water Resources Protection, 2010, 26(6): 37-41. (in Chinese))
- [6] 王超. 土壤及地下水污染研究综述[J]. 水利水电科技进展, 1996, 16(6): 1-4. (WANG Chao. Advance in science and technology of water resources[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 1996, 16(6): 1-4. (in Chinese))
- [7] 杨士红, 彭世彰, 徐俊增, 等. 不同水肥处理对稻田土壤中氮素剖面分布与氨挥发损失的影响[J]. 水利水电科技进展, 2010, 30(1): 40-44. (YANG Shihong, PENG Shizhang, XU Junzeng, et al. Influences of different water and fertilizer treatments on distribution of nitrogen profiles and loss of ammonia volatilization[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2010, 30(1): 40-44. (in Chinese))
- [8] 万书勤, 康跃虎, 刘士平. 华北平原滴灌灌溉频率对萝卜生长的影响[J]. 灌溉排水学报, 2003, 22(2): 26-30. (WAN Shuqin, KANG Yuehu, LIU Shiping. Effects of irrigation frequency on radish growth under drip irrigation in North China Plain[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2003, 22(2): 26-30. (in Chinese))
- [9] 刘洪禄, 吴文勇, 师彦武, 等. 北京市再生水利用潜力与配置方案研究[J]. 农业工程学报, 2006(增刊2): 289-291. (LIU Honglu, WU Wenyong, SHI Yanwu, et al. Reclaimed wastewater use potential and collocation scheme for different industries in Beijing[J]. Transactions of the CSAE, 2006(Sup2): 289-291. (in Chinese))
- [10] 裴亮, 蒋树芳, 刘士平, 等. 再生水灌溉水处理工艺及灌溉技术要求研究[J]. 水利水电技术, 2012, 43(1): 93-97. (PEI Liang, JIANG Shufang, LIU Shiping, et al. Research on water treatment technology for reclaimed water irrigation and its relevant technical requirements[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2012, 43(1): 93-97. (in Chinese))
- [11] 康跃虎, 王凤新, 刘士平, 等. 滴灌调控土壤水分对马铃薯生长的影响[J]. 农业工程学报, 2004, 20(2): 66-72. (KANG Yuehu, WANG Fengxin, LIU Shiping, et al. Effects of water regulation under drip irrigation on potato growth[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(2): 66-72. (in Chinese))
- [12] 裴亮, 张体彬, 陈永莲, 等. 农村生活污水再生水滴灌对根际土壤特性的影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(4): 42-45. (PEI Liang, ZHANG Tabin, CHEN Yonglian, et al. Influence of reclaimed water drip irrigation with rural domestic sewage on soil peculiarity in rhizosphere[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2012, 31(4): 42-45. (in Chinese))
- [13] GB 5084—2005 农田灌溉水质标准[S].
- [14] 黄志强, 袁念念. 控制排水条件下旱地排水及氮素流失规律研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2012, 40(4): 412-419. (HUANG Zhiqiang, YUAN Niannian. Drainage and nitrogen loss in dry soils with controlled drainage[J]. Journal of Hehai University: Natural Sciences, 2012, 40(4): 412-419. (in Chinese))
- [15] 齐学斌. 不同潜水埋深污水灌溉氮素运移及对作物影响试验研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2008.