植物营养与肥料学报 2017, 23(3): 597–605
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer
doi: 10.11674/zwyf.16453
http://www.plantnutrifert.org

生育期水分调控对甘肃河西地区滴灌春小麦氮素吸收和利用的影响

张雨新，张富仓*，邹海洋，陈东峰，范军亮
（西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室/西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院，陕西杨凌 712100）

摘要:【**目的**】针对河西地区水资源短缺、作物水肥利用效率低等问题，研究滴灌施肥条件下生育期土壤水分调控对河西地区春小麦氮素吸收和利用的影响，以期探索提高氮肥利用效率的土壤水分调控模式。【**方法**】以春小麦‘永良 4 号’为试验材料进行田间小区试验，根据前期的滴灌施肥试验，施氮量为 N 180 kg/hm^2，在春小麦生育期设置 5 个土壤水分下限 (W1、W2、W3、W4 和 CK) 控制水平，研究生育期土壤水分调控对河西地区滴灌春小麦氮素吸收、分配和转运及根区土壤硝态氮含量的影响。【**结果**】1) 一定的施肥水平下，土壤水分下限的增长会增加各处理小麦的生育期总灌水量，以充分灌溉 (CK) 处理最大，分别比 W1、W2、W3、W4 处理高 26.6%、15.0%、9.3% 和 4.8%。2) 灌水量的增加会促进小麦植株对土壤养分的吸收同化，与 W4 处理相比，W1、W2、W3 处理的氮素吸收量分别显著减少 29.3%、23.0% 和 15.5%，CK 与 W4 处理差异不显著 (P>0.05)。3) 成熟期各处理小麦营养器官中氮素吸收量以 CK 处理最大，分别比 W1、W2、W3、W4 处理高 28.2%、28.6%、19.2% 和 12.7%，但其子粒中的氮素吸收量比 W4 处理显著低 10.4%。开花期后营养器官中的氮素向子粒的转移量和转移率均以 W4 处理最大，分别比 W1、W2、W3、CK 处理显著增加 40.4%、28.0%、10.6%、10.0% 和 6.8%、3.5%、1.3%、6.9%，但 W4 处理小麦氮素转移量对子粒的贡献率最小 (76.2%)。随着土壤水分下限的增加，各处理氮素吸收效率、氮素生产效率及氮素收获指数呈先增加后减小的变化趋势，均在 W4处理下获得最大值。4) 在一定施肥水平下，灌水量的增加会加大硝态氮向土壤深处运移，不利于小麦植株对土壤硝态氮的吸收利用。5) 生育期土壤水分调控对小麦根区土壤硝态氮含量有显著性影响，成熟期 0—100 cm 土层内土壤硝态氮累积量以 W4 处理最小，分别比 W1、W2、W3 和对照 (CK) 处理减少 9.6%、7.2%、6.6% 和 1.4%。【**结论**】适宜的土壤水分调控更有利于小麦植株对土壤养分的吸收，综合考虑氮素吸收、分配及土壤硝态氮等因素，W4 是基于本试验条件下河西地区滴灌春小麦最佳土壤水分下限处理。

关键词: 春小麦；土壤水分调控；氮素吸收和利用；土壤硝态氮

Effects of soil water regulation at different growing stages on nitrogen uptake and utilization of spring wheat in the Hexi Region, Gansu Province

ZHANG Yu-xin, ZHANG Fu-cang*, ZOU Hai-yang, CHEN Dong-feng, FAN Jun-liang
(*Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas of Ministry of Education, Northwest A&F University/Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&FUniversity, Yangling, Shaanxi 712100, China*)

Abstract:【**Objectives**】In Hexi Region of Gansu Province, there is shortage of water resource, and the water and fertilizer use efficiencies of crops are low. The nitrogen uptake and utilization of spring wheat was studied, to find the effective regulation mode of soil water at different growing stages of spring wheat.【**Methods**】Field experiments were carried out with the spring wheat cultivar of ‘Yongliang 4’ as materials at a nitrogen application rate of N 180 kg/hm^2. Five lower soil water supply treatments, recorded as W1, W2, W3, W4 and CK

收稿日期：2016–11–30　　**接受日期：**2017–02–17
基金项目：国家“十二五”863计划项目课题（2011AA100504）；农业部公益性行业科研专项（201503124）；教育部高等学校创新引智计划项目（B12007）资助。
作者简介：张雨新（1992—），女，辽宁北票市人，硕士研究生，主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail：772394594@qq.com
* 通信作者 E-mail：zhangfc@nwsuaf.edu.cn

(sufficient irrigation) were set up at the four growing stages of spring wheat. The accumulation, distribution and translocation of nitrogen in spring wheat were determined, and the rhizosphere soil NO_3^--N contents were analyzed at the same time.【**Results**】1) When the low soil water limit became high, the irrigation amount of spring wheat would be increased, and the increment in CK was significantly higher than in W1, W2, W3 and W4 treatments, with the corresponding increase of 26.6%，15.0%，9.3% and 4.8%, respectively. 2) Increased irrigation promoted the soil nutrient assimilation by wheat plants. Compared with W4 treatment, the nitrogen assimilation of wheat was significantly reduced by 29.3%, 23.0% and 15.5% in the W1, W2 and W3 treatments, respectively, while the difference was not significant between the W4 and CK. 3) Compared with the W1, W2, W3 and W4 treatments, the nitrogen assimilation in vegetative organs of the CK treatment at the maturity was increased by 28.2%, 28.6%, 19.2% and 12.7%, respectively, while the grain nitrogen assimilation of the CK treatment was significantly reduced by 10.4% compared with the W4 treatment. The W4 had the highest nitrogen translocation amount and efficiency except for its decreasing contribution proportion (76.2%). Compared with the W1, W2, W3 and CK treatments, the nitrogen translocation amount and efficiency were increased by 40.4%, 28.0%, 10.6%, 10.0% and 6.8%, 3.5%, 1.3%, 6.9%, respectively. With the increase of lower soil water limits, the nitrogen uptake efficiencies, nitrogen productive efficiencies and nitrogen harvest indices in all treatments increased first and then decreased, while the W4 had the most obvious changing trend. 4) At the same fertilizer level, the increase in irrigation amount increased the movement of the soil NO_3^--N into deep soil, which was not good for wheat plants to absorb soil NO_3^--N. 5) The soil water regulation at different growing stages had significant effects on soil NO_3^--N contents. At the maturity stage, the treatment W4 showed the lowest soil NO_3^--N accumulation in the 0–100 cm soil layer, which was reduced by 9.6%, 7.2%, 6.6% and 1.4%, respectively, compared with those of the W1, W2, W3 and CK treatments.【**Conclusions**】The appropriate soil water regulation is beneficial to the soil nutrient uptake by spring wheat plants. Comprehensively considering the nitrogen accumulation, distribution, and soil NO_3^--N contents, the treatment W4 is selected as the optimal mode for spring wheat in the Hexi Region under present experimental conditions.

Key words: spring wheat; soil water regulation; nitrogen uptake and utilization; soil NO_3^--N content

土壤水分、氮肥管理、土壤类型、气候和作物管理是影响小麦产量的限制性因素，其中土壤水分和氮素的亏缺是影响小麦生产力的最主要因素[1–2]。为实现作物节水高产优质的目标，就要协调灌水和施肥关系达到最优[3]。有研究认为，过度利用地下水资源进行灌溉，一方面会降低地下水位，另一方面会将大量土壤硝态氮淋移到深层土壤，造成经济损失和环境污染[4–5]。因此研究不同土壤水分调控对河西地区滴灌春小麦氮素吸收和土壤硝态氮的影响，对提高小麦水肥利用效率和改善土壤水肥环境具有重要意义。

近年来，国内外学者对调亏灌溉条件下的作物养分吸收情况进行了大量研究。Mon 等[6]研究表明，在干旱地区进行水肥优化管理是生产高蛋白质小麦的关键。谢志良等[7]研究了膜下滴灌水肥耦合对棉花氮素吸收的影响，结果表明，植物氮素的累积随着生育期的推进明显增加。王小燕等[8]通过研究不同施氮量条件下灌水量对小麦氮素吸收转运和分配的影响发现，干旱胁迫不利于小麦植株对氮素的吸收，随着灌水量和灌水次数的增加小麦开花前后植株对氮素的吸收量显著增加。王朝辉等[9]研究了不同生育期亏水和补充灌溉对冬小麦氮、磷、钾吸收及在体内分配的影响，结果表明，水分缺乏不仅抑制作物的生长，还会降低作物对养分吸收；拔节期是小麦营养生长旺盛期，补水会促进营养器官生长，从而影响生育后期营养器官氮素向子粒的转运和分配。石岩等[10]通过对土壤水分胁迫下小麦养分分配和产量的研究得出，适度水分胁迫有利于提高氮肥利用效率，以达到节水、节肥的目的。硝态氮是农田氮素淋失的主要形式，灌溉对硝态氮淋溶量的影响程度显著高于施氮量[11]。杜军等[12]研究了灌水量对小麦硝态氮淋溶损失的影响，结果表明，灌水量越大，土壤水分达到饱和的时间越短，作物来不及吸收更多的水分和养分，在这种条件下，土壤水分下渗的速度就越快，硝态氮更容易被淋洗至深层土壤。岳文俊等[13]通过对甜瓜进行灌水和施肥的组合处理，研究

发现根系层内作物对硝态氮的有效吸收利用可以减少硝态氮向深层移动，但当硝态氮含量超过作物吸收量时，灌水和施氮均会导致土壤硝态氮过量累积。在以往关于作物水肥耦合效应及调控的研究中，较多的是研究旱作条件下的以肥促水、水肥互作效应，而根据作物不同生育期土壤水分下限进行灌溉调控作物的养分吸收研究较少。本文通过研究不同生育期土壤水分调控对河西地区春小麦氮素吸收、分配和转运及土壤硝态氮含量的影响，以期探索出适宜的土壤水分调控模式，为河西地区春小麦节水增产提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验区概况

本试验于甘肃省武威市中国农业大学石羊河流域农业与生态节水试验站进行，该地区地处腾格里沙漠边缘 (37°50′49″N、102°51′01″E)。海拔高度 1500 m，大陆性温带干旱气候，年平均气温 8℃，年均日照时数 3000 h 以上，年均降水量不足 200 mm，年均水面蒸发量 2000 mm以上。试验地土质为灰钙质轻砂壤土，根层土壤干容重为 1.23 g/cm^3，田间持水量 (体积含水率) 为 21.3%。耕作层土壤养分含量为有机质 4～8 g/kg、硝态氮含量 52.13 mg/kg、铵态氮含量 6.70 mg/kg、速效磷含量为 5～8 mg/kg。

1.2　试验设计

分别在不同生育期设置 5 个土壤水分灌溉下限处理，分别记为 W1、W2、W3、W4 和充分灌溉 (CK) 处理，每个处理以控制土壤含水量占田间持水量的百分数表示 (表 1)。每个处理 3 次重复，共计 15 个小区，小区面积为 50 m^2 (5 m × 10 m)。供试春小麦品种‘永良 4 号’，15 cm 等行距播种，一带四行，第 2～3 行铺设滴灌带，各滴头流量相同。试验中氮肥用尿素 (N 46%)，钾肥用硫酸钾镁 (K_2O 52%)，磷肥用磷酸二铵 (P_2O_5 46%)，各处理施肥量均在同一水平并随水施肥。按照当地大田施肥标准，分别在苗期施 N 18 kg/hm^2、P_2O_5 9 kg/hm^2、K_2O 9 kg/hm^2；在拔节期共施 N 54 kg/hm^2、P_2O_5 27 kg/hm^2、K_2O 27 kg/hm^2，分三次施入，抽穗期和灌浆期同拔节期；生育期内共施 N 180 kg/hm^2、P_2O_5 90 kg/hm^2、K_2O 90 kg/hm^2。

1.3　测定项目与方法

1.3.1 土壤含水量的测定及灌水量计算　土壤含水量采用传统的土钻取土烘干法测定，取样深度 (0—40 cm)；各处理土壤含水量小于设置下限即进行灌溉，灌至田间持水量的 100%，计划湿润层深度为 60 cm。灌水量的计算公式[15]如下：

$$M = 10 \times \gamma \times H \times (100\% \times \theta i - \theta j)$$

式中，M 为灌水量 (mm)；γ 为土壤容重 (g/cm^3)；H 为计划湿润层深度 (cm)；θi 为田间持水量；θj 为测定的土壤含水量。

1.3.2 植株氮素吸收量测定　于分蘖、孕穗、开花、灌浆和成熟期进行群体动态调查和取样，其中在分蘖、孕穗、灌浆 3 个生育期每小区连续选取 20 株小麦完整植株；开花期按茎杆 + 叶鞘、叶片、穗 3 部分取样，成熟期按茎杆 + 叶鞘、叶片、颖壳 + 穗轴和子粒 4 部分取样。样品放入 105℃ 烘箱中杀青 15 min，于 80℃ 烘至恒重，称干物质重；经浓硫酸消煮，用 AA_3 型连续流动分析仪测定植物样品全氮含量。

1.3.3 土壤硝态氮含量测定　分别在分蘖、孕穗、开花和成熟期，用土钻取 0—100 cm 土层土样，分层取土，20 cm 为一层，分成两份，一份置于铝盒中，采用烘干法测定土壤含水量；另一份晾干磨细过筛

表 1　不同处理小麦各生育期土壤水分下限和总灌水量

Table 1　Low limit of soil moisture in different growth stages of spring wheat and total irrigation in various treatments

处理 Treatment	土壤水分下限 Low limit of soil moisture(%)				总灌水量 Total irrigation (mm)
	苗期～分蘖 Emergence–Tillering	拔节～孕穗 Jointing–Booting	抽穗～开花 Heading–Anthesis	灌浆～成熟 Filling–Maturity	
W1	55	60	55	50	284.8
W2	60	65	60	55	313.3
W3	65	70	65	60	329.9
W4	70	75	70	65	343.9
CK	75	80	75	70	360.4

注（Note）：水分下限为田间持水量的百分数 The low water limit was the percentage of field water capacity.

后，称取 2.5 g 土壤样品，加入 25 mL 2 mol/L 的 KCl 溶液，振荡 30 min 后过滤，浸提液用 AA_3 型连续流动分析仪测定土壤硝态氮含量。

0—100 cm 土层内的硝态氮累积量计算公式[25]如下：

$$M = \frac{CH\gamma}{10}$$

式中：M 为土壤硝态氮的积累量 (kg/hm²)；C 为土壤硝态氮含量 (mg/kg)；H 为土层深度 (cm)；γ 为土壤容重 (g/cm³)。

1.4 数据处理与统计分析

植株氮素吸收、转运及氮素利用效率的计算公式[22–23]:

各生育期不同器官氮素吸收量 = 氮素含量 (%) × 干物质质量；

各器官氮素分配比例 = 各器官氮素吸收量/单茎总含氮量 × 100%；

营养器官氮素转移量 = 开花期营养器官氮素吸收量 – 成熟期营养器官氮素吸收量；

营养器官氮素转移率 = 营养器官氮素转移量/开花期营养器官氮素吸收量 × 100%；

营养器官氮素贡献率 = 营养器官氮素转移量/成熟期子粒氮素吸收量 × 100%；

氮素吸收效率 (kg/kg) = 植株氮素吸收量/施氮量；

氮素利用效率 (kg/kg) = 子粒产量/植株氮素吸收量；

氮素收获指数 = 子粒氮素吸收量/植株氮素吸收量；

氮肥生产效率 (kg/kg) = 子粒产量/施氮量。

采用 SPSS 22.0 统计分析软件对试验数据进行显著性方差分析，采用 Microsoft Excel 2007 进行数据处理，Origin 9.3 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 不同生育期土壤水分调控对春小麦灌水量的影响

由土壤水分调控下春小麦各生育期灌水量和灌水次数 (图 1) 可知，播种前各处理土壤含水量均低于田间持水量，故需将其分别灌至同一田间持水量水平。在拔节期以前，与充分灌溉 (CK) 处理相比，W4 处理的小麦灌水量减少 26.4%；在抽穗～开花期，对照 (CK) 处理的小麦灌水量比 W4 处理减少 58.3%。这说明在以营养生长为主的生育前期，高灌水量处理条件下小麦对土壤水分的消耗较大，但不利于小麦在生育后期对土壤水分的吸收利用。在灌浆～成熟期，W3、W4 处理的土壤水分消耗速率

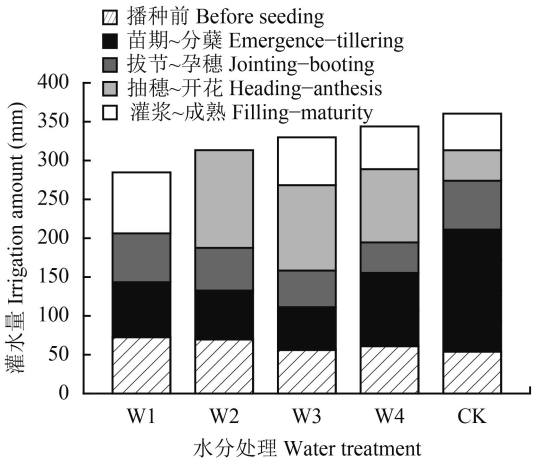

图 1 不同土壤水分调控处理春小麦各生育期灌水量

Fig. 1 Irrigation amounts at different growth stages of spring wheat under the soil water regulation

较抽穗～开花期的消耗速率分别降低 55.2%、53.3%。在整个生育期内各处理的小麦灌水量和灌水次数满足 CK > W4 > W3 > W2 > W1。以上结果表明，不同土壤水分调控处理下，小麦植株对土壤水分的吸收利用能力不同，生育期内适宜的土壤水分调控更有利于小麦在整个生育期内对土壤水分的持续利用，进而促进小麦植株对氮素的吸收。

2.2 不同生育期土壤水分调控对春小麦植株氮素吸收、分配和转运的影响

2.2.1 小麦植株地上部氮素吸收量 从春小麦各生育期不同水分调控下氮素吸收情况 (图 2) 可知，不同水分调控下，春小麦各生育期氮素吸收速率均随小麦的生长呈“慢–快–慢”的变化趋势。在分蘖期，

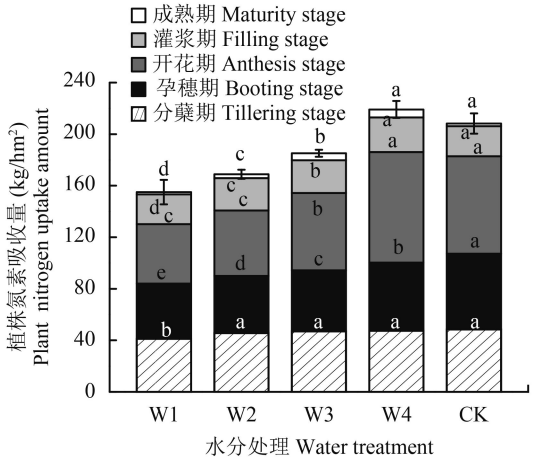

图 2 不同土壤水分调控处理春小麦各生育期植株氮素吸收量

Fig. 2 Nitrogen uptake amount at different growth stages of spring wheat under the soil water regulation

小麦以营养生长为主，不同水分调控下小麦植株对氮素的吸收较少，其中 W1、W2、W3、W4 处理分别较充分灌溉 (CK) 处理的氮素吸收量减少 15.3%、6.0%、3.3% 和 2.4%，各处理差异不显著 ($P > 0.05$)。在孕穗～开花期各处理小麦地上部阶段氮素吸收量均达到全生育期的最大值，其中以 W4 处理下的氮素吸收量最大 (138.78 kg/hm^2)，这说明适宜的土壤水分调控更有利于小麦植株对氮素的吸收。开花期后，不同水分调控下的小麦阶段氮素吸收量呈明显的下降趋势。相较于孕穗～开花期，开花～灌浆期时 W1、W2、W3、W4 和 CK 处理条件下的小麦氮素吸收速率分别减少 17.0%、15.0%、15.2%、13.4% 和 21.5%。以上结果表明，过高和过低的灌水量均不利于小麦植株对氮素的持续吸收；孕穗～开花期是小麦植株进行氮素吸收的关键期。

2.2.2 成熟期小麦各器官氮素的分配　由表 2 可知，不同水分调控下小麦各器官氮素的分配量和分配比例有所差异，但大多数表现为子粒 > 茎杆 + 叶鞘 > 穗轴 + 颖壳 > 叶片；其中各处理小麦茎杆 + 叶鞘和叶片的氮素分配量均满足 CK > W4 > W3 > W2 > W1， CK 与 W4 处理没有显著性差异 ($P > 0.05$)。W4 处理条件下，穗轴 + 颖壳的氮素分配量显著小于其他处理，但其子粒中的氮素分配量最大 (167.90 kg/hm^2)，与之相比，W1、W2、W3、CK 处理分别减少了 34.5%、26.2%、18.6% 及 10.4%。由此可见，灌水量的增加有利于小麦子粒中氮素的分配，但过高的灌水量反而会促进营养器官中氮素的吸收，进而使得子粒中的氮素分配量降低。

2.2.3 开花后营养器官中的氮素向子粒的转移　由表 3 可以看出，不同水分调控下，小麦植株营养器官在开花期的氮素吸收量大于成熟期，这说明开花期后营养器官中贮存的氮素向子粒中发生转移。随着土壤水分的增加，成熟期小麦开花后营养器官氮素向子粒的转运量和转运率均呈先增大后减小的变化趋势；以 W4 处理最大，其中 W1 处理分别比 W4 减小 28.8%、6.4%；CK 处理分别比 W4 处理减小 9.1%、

表 2　不同土壤水分调控处理小麦成熟期各器官氮素的分配

Table 2　Distribution of nitrogen of spring wheat under different soil water regulation at the maturity

处理 Treatment	茎杆叶鞘 Stem and sheath		叶片 Leaf		穗轴颖壳 Spike axis and glume		子粒 Grain	
	数量 (kg/hm^2) Amount	比例 (%) Ratio	数量 (kg/hm^2) Amount	比例 (%) Ratio	数量 (kg/hm^2) Amount	比例 (%) Ratio	数量 (kg/hm^2) Amount	比例 (%) Ratio
W1	19.04 c	12.28 b	6.70 c	4.32 b	19.30 a	12.45 a	109.99 d	70.95 b
W2	20.94 c	12.40 b	8.53 c	5.05 ab	15.43 b	9.14 b	123.95 c	73.41 b
W3	24.44 b	13.20 ab	9.71 bc	5.24 ab	14.30 b	7.72 c	136.70 c	73.83 b
W4	29.48 a	13.44 ab	12.83 ab	5.85 ab	8.95 c	4.08 e	167.90 a	76.61 a
CK	30.12 a	14.46 a	14.58 a	7.00 a	13.05 b	6.27 d	150.48 b	72.27 b

注（Note）：同列中数据后不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values within the same column with different letters are significantly different among different treatments ($P < 0.05$).

表 3　不同土壤水分调控处理冬小麦开花后营养器官氮素向子粒的转移量和转移率

Table 3　Nitrogen translation amount and translation rate from vegetative organs to grain after the anthesis under different soil water regulation

处理 Treatment	氮吸收量 N uptake (kg/hm^2)		转移量 (kg/hm^2) Translocation amount	转移率 (%) Translocation rate	贡献率 (%) Contribution
	开花期 Anthesis	成熟期 Maturity			
W1	136.07 d	45.04 c	91.03 c	66.80 b	82.76 a
W2	144.65 c	44.90 c	99.75 c	68.95 ab	80.48 ab
W3	163.94 b	48.45 bc	115.50 b	70.43 ab	84.48 a
W4	179.03 a	51.26 b	127.78 a	71.37 a	76.19 b
CK	173.89 a	57.75 a	116.14 b	66.77 b	77.21 b

注（Note）：同列数据后不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different letters in the same column are significantly different among different treatments($P < 0.05$).

6.4%，W3 与 CK 处理没有显著性差异 ($P > 0.05$)；但 W4 处理条件下的小麦氮素转移量对子粒的贡献率比 W1、CK 处理分别减小 7.9%、1.3%。这说明，小麦子粒中氮素的吸收量除开花期后营养器官中氮素向子粒的转移外，还有开花期后小麦从土壤中吸收同化的氮素；适宜的土壤水分调控更有利于小麦开花期后营养器官中的氮素向子粒中转移。

2.3 不同生育期土壤水分调控对春小麦氮肥利用的影响

如表 4 所示，土壤水分下限的适度增长提高了小麦氮素利用效率，与 W3 处理相比，W1、W2、W4 和 CK 处理的小麦氮素利用效率分别显著降低 26.0%、16.1%、9.1% 和 8.1%，这说明过高和过低的灌水量均不利于小麦植株对氮素的利用。各处理小麦氮素吸收效率、氮肥生产效率和收获指数均随灌水量的增加呈先增大后减小的变化趋势，以 W4 处理最高，分别比 W1 处理显著高 52.5%、73.8%、8.5%。以上结果表明，适宜的土壤水分调控会减少氮素的淋失，促进小麦植株对氮肥的吸收利用和向子粒的分配，进而提高其氮素生产效率和收获指数，有利于小麦获得高产。

2.4 不同生育期土壤水分调控对春小麦 0—100 cm 土层硝态氮含量分布的影响

由图 3 可知，随着小麦生育期的推进，各处理土壤中硝态氮含量的变化趋势不同。

分蘖期各处理土壤硝态氮含量的峰值均出现在 0—20 cm 土层中，其中 W1 处理比 CK 处理高 62.5%。随着土壤深度的增加，大于 80 cm 的土层中硝态氮含量满足 CK 处理 > W4 > W3 > W2 > W1。相较于分蘖期，在孕穗期各处理 0—20 cm 土层中的硝态氮含量明显降低；各处理硝态氮含量的峰值出现在 80—100 cm 土层中，其中以充分灌溉 (CK) 处理处理最大 (40.57 mg/kg)，比 W1 处理显著高 25.5%，这说明低灌水量处理下的土壤硝态氮含量较多地集中于表层土壤；随着灌水量的增加，土壤中的硝态氮会随着土壤水向土层下部移动，从而造成氮肥的淋失。

由图 3 可以看出，开花期随着土壤深度的增加，在 60—80 cm 土层中硝态氮含量变化最大；与 CK 处理相比，W4 处理的硝态氮变化量减小 19.2%。与开花期相比，成熟期 0—20 cm 土层中各处理硝态氮含量有所减少；高灌水量下的小麦硝态氮含量随着土壤深度的增加不断增大，在 80—100 cm 土层硝态氮含量有显著的增加。以上结果表明，成熟期小麦对养分的吸收能力降低，使得更多的氮肥随着灌溉水向土壤深层移动。

2.5 不同生育期土壤水分调控对成熟期春小麦 0—100 cm 土层内硝态氮累积的影响

由图 4 可知，随着灌水量的增加，春小麦 0—100 cm 土层内硝态氮累积总量呈先减小后增大的变化趋势，以 W4 处理最小 (344.76 kg/hm^2)，W4 处理与 CK 处理没有显著性差异 ($P > 0.05$)。通过计算 0—100 cm 各土层硝态氮累积量占整个土层累积量的比例可知，0—20 cm 土层硝态氮累积量占 0—100 cm 土层累积量的比例满足 W1 > W2 > W3 > CK、W4 处理；随着土壤深度的增加，在 80—100 cm 土层，充分灌溉 (CK) 处理的硝态氮累积量占 0—100 cm 土层累积量的比例，分别比 W1、W2、W3 和 W4 处理显著高 34.5%、22.7%、12.9% 和 10.1%。以上结果表明，低灌水量处理的土壤硝态氮主要集中在土壤表层，随着土壤水分的增加，土壤中的硝态氮会发生淋失，从而造成过多的硝态氮下移至深层土壤；一定的施肥条件下，W4 处理更有利于小麦植株对氮素的吸收，从而使得土壤中的硝态氮含量降低。

表 4 不同土壤水分调控处理春小麦氮素的吸收和利用

Table 4 Nitrogen uptake and use efficiency of spring wheat affected by soil water regulation

处理 Treatment	产量 (kg/hm^2) Yield	氮素吸收效率 (kg/kg) N uptake efficiency	氮素利用效率 (kg/kg) N use efficiency	氮肥生产效率 (kg/kg) N productive efficiency	氮收获指数 N harvest index
W1	4300.08 d	0.61 e	27.80 d	23.89 d	0.71 b
W2	5318.12 c	0.69 d	31.50 c	29.55 c	0.73 ab
W3	6952.41 b	0.76 c	37.55 a	38.62 b	0.74 ab
W4	7476.04 a	0.93 a	34.14 b	41.53 a	0.77 a
CK	7183.46 b	0.84 b	34.52 b	39.91 b	0.72 b

注（Note）：同列数据后不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different letters in the same column are significantly different among different treatments($P < 0.05$).

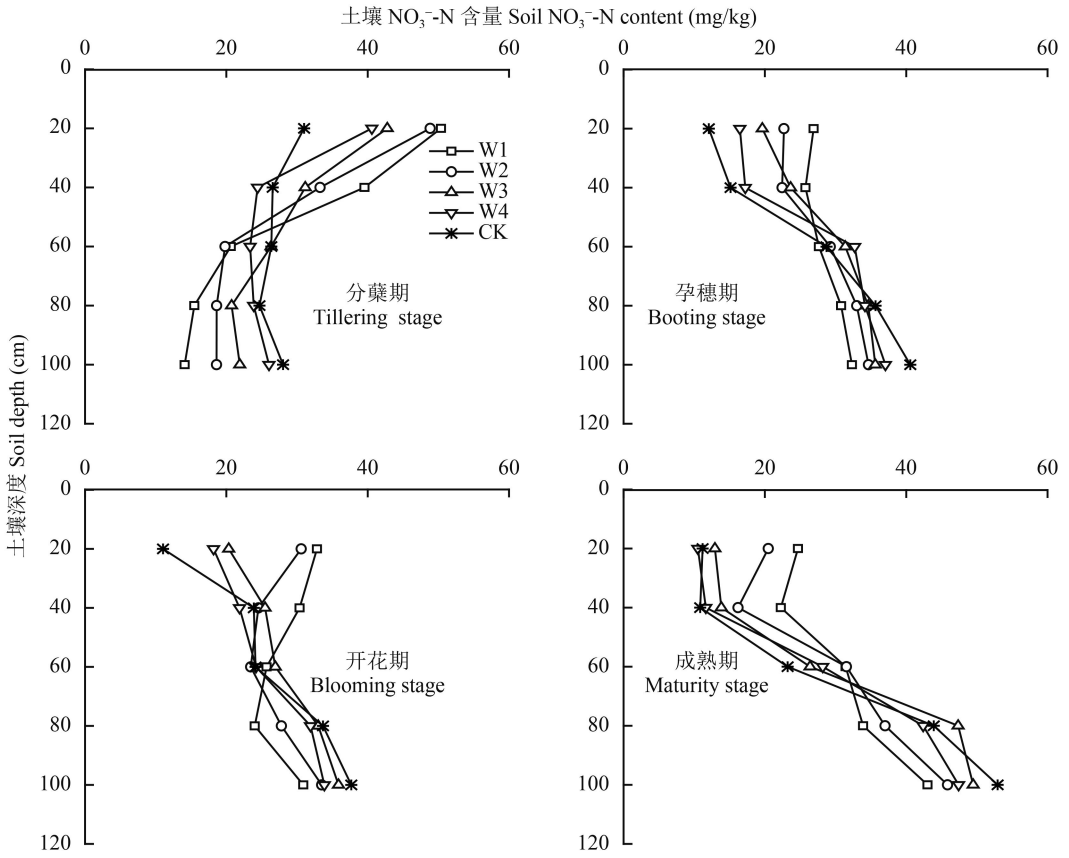

图 3　不同土壤水分调控处理春小麦 0—100 cm 土层硝态氮的含量分布

Fig. 3　NO_3^--N distribution in 0–100 cm soil layer affected by soil water regulation

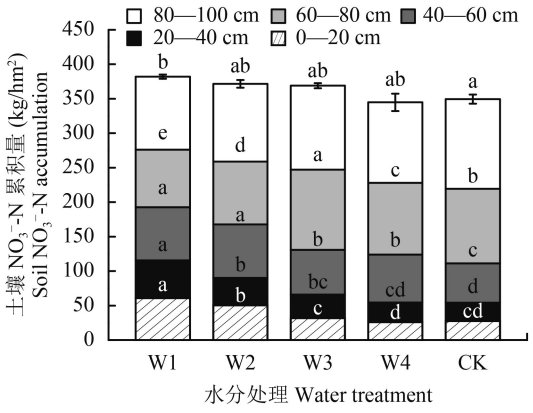

图 4　不同土壤水分调控处理春小麦 0—100 cm 土层内硝态氮的累积量

Fig. 4　NO_3^--N accumulation in 0–100 cm soil under different soil water regulation

3　讨论

近年来，随着社会经济的快速发展和人口的急剧增加，河西地区水资源被过度开发利用，工农业之间、农村与城市以及上下游之间的水资源供需矛盾日益突出[14]。

王国栋等[15]研究发现优化灌溉制度对于作物节水增产的获得具有重要的作用，本文通过在不同生育期对小麦进行控墒补灌，研究其对滴灌春小麦氮素吸收和利用的影响。结果表明，在小麦整个生育期内，各处理的灌水次数和灌水量以充分灌溉 (CK) 处理最大，但其产量显著低于 W4 处理，说明过高的灌水量并不利于小麦的增产，这与前人研究结果一致[16]。

王声斌等[17]认为，灌水量的增加有利于小麦对氮素的吸收，且在小麦的大部分生育阶段低灌水量处理的“阶段吸收量”都低于高灌水量处理。本研究中，成熟期各处理氮素总吸收量最高，其中 W4 处理显著高于 W1 和充分灌溉 (CK) 处理，这说明过高的灌水量对小麦的氮素吸收无益，且易造成土壤中硝态氮随灌水向土壤深层迁移[18]。本试验结果表明，随着小麦生育期的推进，各处理小麦地上部氮素吸收量均呈不断增加的变化趋势，在生育末期达到最大值，这与前人研究结果一致[19]。

对于土壤水分调控对成熟期小麦氮素分配的影响，李世娟等[20]认为在土壤水分和氮肥量适宜的基础上增加灌水和增施氮肥均不利于氮素向小麦子粒的

转移。在本试验中，小麦各器官氮素分配量均以低灌水量 W1 处理最小，茎杆 + 叶鞘和叶片中氮素分配量以充分灌溉 (CK) 处理最大，但其子粒中的氮素分配量均显著低于 W4 处理。亦有研究认为，灌水有促进氮素从小麦各营养器官向子粒转移的作用[21]。在本研究中，各处理小麦营养器官氮素转移量和转移率均随着灌水量的增加呈先增加后减小的变化趋势，其中 W4 处理显著高于充分灌溉处理，但其向子粒的贡献率最小，这是由于子粒中的氮素来源于两部分，一部分为开花前吸收并贮存在营养器官中于开花后转移到子粒中的氮素，另一部分为开花后植株吸收同化的氮素[22]。

郑成岩等[23]认为，灌水量和灌溉时期对小麦植株的氮素吸收利用有显著的调控效应。刘新宇等[24]认为，植物利用氮素是阻止氮素向下迁移，提高其生物有效性的有效途径。在本试验条件下，灌水量的增加不利于小麦氮素吸收利用效率的持续增长，充分灌溉处理与 W3 处理的氮素吸收效率、氮素生产效率及氮素收获指数没有显著性差异，且均显著低于 W4 处理。

土壤中的硝态氮除了被作物根系有效吸收外，还会在土壤水分的作用下随着生育期的推进逐渐向下层运移并在土壤中累积[25–26]。Wang 等[27]认为高灌水量处理在加剧硝态氮向土壤深层淋失的同时，也提高了小麦植株的氮素吸收量。在本试验中，分蘖期各处理小麦根区土壤硝态氮累积主要集中在 0—40 cm 处；随着土壤深度的增加，各处理硝态氮累积量差异不显著 ($P > 0.05$)；不同生育期，小麦根区土壤的硝态氮含量并未随着灌水量和土壤深度的增加持续增长，成熟期各处理 100 cm 处土壤硝态氮含量表现为 CK > W3 > W4、W2 > W1。王晓英等[28]研究发现，灌水会导致收获期 0—100 cm 土层中硝态氮累积量增高，这与本试验结果不同，这可能是由于本试验中的灌水量较大，使得硝态氮向更深层土壤运移，加大氮肥的淋失。由此可见，适宜的土壤水分调控 (W4 处理) 更能促进小麦植株对氮素的有效利用。

高亚军等[29]认为灌水量对硝态氮累积和迁移的深度有显著性影响，施氮量也是决定农田硝态氮去向的重要因素。本试验仅从不同生育期土壤水分调控对春小麦氮素吸收和利用的影响进行了研究，而对于适宜的土壤水分调控条件下，氮肥的优化管理还需要进一步的研究。

4 结论

不同生育期土壤水分调控对滴灌春小麦的氮素吸收和利用具有显著性影响。随着土壤水分下限的增长，在增大各处理灌水量和灌水次数的同时，也促进小麦植株对土壤养分的吸收利用和开花后营养器官氮素向子粒的转移。随着生育期的推进，各处理小麦地上部氮素吸收量不断增加，并在成熟期达到最大值，其中 W4 处理显著高于其他处理。在充分灌溉处理下，小麦土壤根区硝态氮随灌溉水向更深处移动，不利于小麦的吸收利用。在小麦开花期后营养器官转移氮素和吸收同化氮素的共同作用下，成熟期 W4 处理小麦子粒中氮素的吸收量和分配比率最大。综上可知，适宜的土壤水分调控更有利于小麦对养分的吸收利用，在本试验条件下，W4 是本试验条件下的最佳土壤水分处理。

参 考 文 献：

[1] Cabrera-Bosquet L, Molero G, Bort J, *et al*. The combined effect of constant water deficit and nitrogen supply on WUE, NUE and Δ13 C in durum wheat potted plants[J]. Annals of Applied Biology, 2007, 151(3): 277–289.

[2] Yousaf M, Fahad S, Shah A N, *et al*. The effect of nitrogen application rates and timings of first irrigation on wheat growth and yield[J]. International Journal of Agriculture Innovations & Research, 2014, 2(4): 645–653.

[3] 邢英英, 张富仓, 吴立峰, 等. 基于番茄产量品质水肥利用效率确定适宜滴灌灌水施肥量[J]. 农业工程学报, 2015, 31(增刊1): 110–121.
Xing Y Y, Zhang F C, Wu L F, *et al*. Determination of optimal amount of irrigation and fertilizer under drip fertigated system based on tomato yield, quality, water and fertilizer use efficiency[J]. Transaction of the Chinese Society of Agriculture Engineering, 2015, 31(Suppl. 1): 110–121.

[4] 王平, 陈新平, 张福锁, 等. 不同水氮处理对棉田氮素平衡及土壤硝态氮移动的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(5): 946–955.
Wang P, Chen X P, Zhang F S, *et al*. Effects of different irrigation and fertilization strategies on nitrogen balance and soil nitrate movement of high-yield cotton system[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(5): 946–955.

[5] Man J, Yu J, White P J, *et al*. Effects of supplemental irrigation with micro-sprinkling hoses on water distribution in soil and grain yield of winter wheat[J]. Field Crops Research, 2014, 161(1385): 26–37.

[6] Mon J, Bronson K F, Hunsaker D J, *et al*. Interactive effects of nitrogen fertilization and irrigation on grain yield, canopy temperature, and nitrogen use efficiency in overhead sprinkler-irrigated durum wheat[J]. Field Crops Research, 2016, 191: 54–65.

[7] 谢志良, 田长彦. 膜下滴灌水氮耦合对棉花干物质积累和氮素吸收及水氮利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(1): 160–165.
Xie Z L, Tian C Y. Coupling effects of water and nitrogen on dry matter accumulation, nitrogen uptake, water and nitrogen use efficiency under mulched drip irrigation[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(1): 160–165.

[8] 王小燕, 于振文. 不同施氮量条件下灌溉量对小麦氮素吸收转运和分配的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41(10): 3015–3024.
Wang X Y, Yu Z W. Effects of irrigation rate on absorption and translocation of nitrogen under different nitrogen fertilizer rate in

wheat[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(10): 3015–3024.

[9] 王朝辉, 李生秀. 不同生育期缺水和补充灌水对冬小麦氮磷钾吸收及分配影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(3): 265–270.
Wang Z H, Li S X. Effects of water deficit and supplemental irrigation at different growing stage on uptake and distribution of nitrogen, phosphorus and potassium in winter wheat[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2002, 8(3): 265–270.

[10] 石岩, 林琪, 李素美, 等. 土壤水分胁迫对小麦养分分配及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(1): 50–56.
Shi Y, Lin Q, Li S M, *et al*. Effect of soil water stress on nutrient and yield of wheat[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1998, 4(1): 50–56.

[11] 石玉, 于振文, 何建宁, 等. 不同测墒补灌水平对小麦水氮利用及土壤硝态氮淋溶的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(2): 445–452.
Shi Y, Yu Z W, He J N, *et al*. Effects of soil-moisture monitoring supplemental irrigation on the water-nitrogen utilization and soil NO_3^--N leaching of wheat[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(2): 445–452.

[12] 杜军, 杨培岭, 李云开, 等. 灌溉、施肥和浅水埋深对小麦产量和硝态氮淋溶损失的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 57–64.
Du J, Yang P L, Li Y K, *et al*. Influence of the irrigation, fertilization and groundwater depth on wheat yield and nitrate nitrogen leaching[J]. Transaction of the Chinese Society of Agriculture Engineering, 2011, 27(2): 57–64.

[13] 岳文俊, 张富仓, 李志军, 等. 水氮耦合对甜瓜氮素吸收与土壤硝态氮累积的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(2): 88–96.
Yue W J, Zhang F C, Li Z J, *et al*. Effects of water and nitrogen coupling on nitrogen uptake of muskmelon and nitrate accumulation in soil[J]. Transaction of the Chinese Society for Agriculture Machinery, 2015, 46(2): 88–96.

[14] 祁旭升. 甘肃河西地区扩种冬小麦的生态效益分析[J]. 西北农业学报, 2004, 13(4): 93–97.
Qi X S. The analysis of eco-benefit of planting winter wheat in west region of Gansu[J]. Acta Agriculturae Boreali-Ooccidentalis Sinica, 2004, 13(4): 93–97.

[15] 王国栋, 曾胜和, 周建伟, 等. 基于控墒补灌的春小麦滴灌制度研究[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(6): 19–25.
Wang G D, Zeng S H, Zhou J W, *et al*. Research on drip irrigation schedule for spring wheat based on soil moisture-controlled irrigation[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(6): 19–25.

[16] 张永丽, 于振文. 灌水量对小麦氮素吸收、分配、利用及产量与品质的影响[J]. 作物学报, 2008, 34(5): 870–878.
Zhang Y L, Yu Z W. Effects of irrigation amount on nitrogen uptake, distribution, use and grain yield and quality in wheat[J]. Acta Agronimica Sinica, 2008, 34(5): 870–878.

[17] 王声斌, 张起刚, 彭根元. 灌溉水平对冬小麦氮素吸收及氮素平衡的影响[J]. 核农学报, 2002, 16(5): 310–314.
Wang S B, Zhang Q G, Peng G Y. Effect of different irrigation on nitrogen uptake of wheat and nitrogen balance[J]. Journal of Nuclear Agriculture Sciences, 2002, 16(5): 310–314.

[18] 薛亮, 马忠明, 杜少平. 水氮耦合对绿洲灌区土壤硝态氮运移及甜瓜氮素吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(1): 139–147.
Xue L, Ma Z M, Du S P. Effects of water and nitrogen coupling on soil nitrate movement and nitrogen uptake of muskmelon[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(1): 139–147.

[19] 祁有玲, 张富仓, 李开峰. 水分亏缺和施氮对冬小麦生长及氮素吸收的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(10): 2399–2405.
Qi Y L, Zhang F C, Li K F. Effects of water deficit and nitrogen fertilization on winter wheat growth and nitrogen uptake[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(10): 2399–2405.

[20] 李世娟, 周殿玺, 诸叶平, 等. 水分和氮肥运筹对小麦氮素吸收分配的影响[J]. 华北农学报, 2002, 17(1): 69–75.
Li S J, Zhou D X, Zhu Y P, *et al*. Effects of water and nitrogen application on nitrogen uptake and distribution in wheat[J]. Acta Agriculture Boreali-Sinica, 2002, 17(1): 69–75.

[21] 许振柱, 于振文, 王东, 等. 灌溉量对小麦氮素吸收和运转的影响[J]. 作物学报, 2004, 30(10): 1002–1007.
Xu Z Z, Yu Z W, Wang D, *et al*. Effects of irrigation amount on absorbability and translocation of nitrogen in winter wheat[J]. Acta Agronimica Sinica, 2004, 30(10): 1002–1007.

[22] 韩占江, 于振文, 王东, 等. 测墒补灌对冬小麦氮素积累与转运及子粒产量的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(6): 1631–1640.
He Z J, Yu Z W, Wang D, *et al*. Effects of supplemental irrigation based on measured soil moisture on nitrogen accumulation, distribution and grain yield in winter wheat[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(6): 1631–1640.

[23] 郑成岩, 于振文, 王西芝, 等. 灌水量和时期对高产小麦氮素积累、分配和转运及土壤硝态氮含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(6): 1324–1332.
Zheng C Y, Yu Z W, Wang X Z, *et al*. Effects of irrigation amount and stage on nitrogen accumulation, distribution, translocation and soil NO_3^--N content in high-yield wheat[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 15(6): 1324–1332.

[24] 刘新宇, 张丽娟, 袁丽金, 等. 耕层水氮调控对小麦利用土壤深层累积硝态氮的影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(17): 3564–3571.
Liu X Y, Zhang L J, Yuan L J, *et al*. Effects of topsoil water and nitrogen control on the utilization of nitrate accumulation in deep soil by wheat[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(17): 3564–3571.

[25] 马忠明, 孙景玲. 施氮量对间作玉米土壤硝态氮累积量及氮肥利用率的影响[J]. 核农学报, 2012, 26(9): 1305–1310.
Ma Z M, Sun J L. Effects of nitrogen rates on NO_3^--N accumulation and nitrogen use efficiency under maize and wheat inter cropped system[J]. Journal of Nuclear Agriculture Sciences, 2012, 26(9): 1305–1310.

[26] Liu C W, Sung Y, Chen B C, *et al*. Effects of nitrogen fertilizers on the growth and nitrate content of lettuce (*Lactuca sativa* L.)[J]. International Journal of Environmental Research & Public Health, 2014, 11(11): 4427–4440.

[27] Wang Q, Li F R, Zhang E H, *et al*. The effects of irrigation and nitrogen application rates on yield of spring wheat (Longfu-920), and water use efficiency and nitrate nitrogen accumulation in soil[J]. Australian Journal of Crop Science, 2012, 6(4): 662–672.

[28] 王晓英, 贺明荣, 刘永环, 等. 水氮耦合对冬小麦氮肥吸收及土壤硝态氮残留淋溶的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(2): 685–694.
Wang X Y, He M R, Liu Y H, *et al*. Interactive effects of irrigation and nitrogen fertilizer on nitrogen fertilizer recovery and NO_3^--N movement across soil profile in a winter wheat field[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(2): 685–694.

[29] 高亚军, 李生秀, 李世清, 等. 施肥与灌水对硝态氮在土壤中残留的影响[J]. 水土保持学报, 2005, 19(6): 61–64.
Gao Y J, Li S X, Li S Q, *et al*. Effects of fertilization and irrigation on residual nitrate N in soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(6): 61–64.