

水氮耦合对土壤理化性状及作物生长的影响研究进展

陈 亚¹, 代先强¹, 袁 玲^{1*}, 刁向银¹, 马红辉², 刘美玉¹

(1. 西南大学 资源环境学院 重庆 400716; 2. 重庆市烟草公司 重庆 400716)

摘要: 水分和氮肥是影响作物生长发育及产质量的重要因素, 为此主要综述了水氮耦合对土壤理化性状、作物生长发育、生理特性、产量和品质影响的研究进展。

关键词: 水氮耦合; 土壤理化性状; 作物; 生长发育

中图分类号: S274 S143 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-3268(2009)05-0011-05

作物生长过程中受水、肥、气、热等诸多因子的影响, 其中, 水肥两因子起着决定性作用, 是作物生产力水平提高的关键因素^[1~3]。而在农业生产中, 灌水过多, 氮肥用量过大所产生的氮素损失对环境的影响已引起人们的关注^[4,5], 氮素损失途径与水氮的管理密切相关。Kessavalou 等^[6]研究发现, 在最佳管理措施和适量的施氮量条件下, 灌水玉米田中硝态氮的淋失量占施氮量的 41%。Timmons 等^[7]的研究结果表明, 低、高灌溉水平下, 硝态氮的淋失分别比不灌溉增加 17% 和 53%。为进一步研究水氮之间互促、互助、互补的耦合作用和控制、互竞的互馈作用, 并揭示其机理, 进而为实现在人工调控下以水定肥, 以肥调水, 提高作物产量、品质以及水分和氮肥利用效率, 减少氮素损失提供依据, 综述了目前国内外有关水氮耦合对土壤理化性状及作物生长发育、生理特性、产量和品质影响的研究进展, 并加以分析论述。

1 水氮耦合对土壤理化性状的影响

1.1 水氮耦合对土壤硝态氮的影响

土壤、水分和肥料是农业生产的最基本要素, 不同灌水量和施氮量对土壤理化性质有不同的影响。梁运江等^[8]的研究表明, 灌水和施氮主要影响 0~20 cm 土层硝态氮含量, 且灌水影响程度大于施氮, 呈负相关, 而与施氮呈正相关。灌水和施氮对 0~40 cm 土层和 40~60 cm 土层硝态氮也有影响, 但施氮影响程度大于灌水。灌水和施氮对 0~20 cm 土

层硝态氮含量影响有相互拮抗作用。刘微等^[9]研究结果也显示, 土壤剖面 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量有随氮肥施用量的增加而增加的趋势, 在同一施氮水平下, 随着土壤深度增加, 呈降低趋势, 并且随着灌水量的增大, 深层土壤中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的含量逐渐增加。周娜娜等^[10]在对马铃薯的研究中也得出相同的结论, 在不同滴灌量条件下, 随着施氮量的增加, 氮素淋失程度加深, 土壤中的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量逐渐增加, 各施氮水平下随着土层的加深又有不同程度的递减。李法云等^[11]在水肥耦合最优饱和试验研究中发现, 在辽西半干旱区, 低水量条件易引起氮肥以铵态氮挥发损失, 当灌水 460 mm 时, 高施氮肥可导致 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 深层淋溶, 造成地下水的污染。目前, 已有许多国家的部分地区, 地下水的硝态氮含量已经超过饮用水标准^[12], 加强这方面的研究对于指导水肥运筹、提高氮肥的利用率、降低氮素在深层土壤的积累, 减少对地下水的污染等都具有重要意义。

1.2 水氮耦合对氮肥利用率的影响

施肥有明显的调水作用, 灌水也有显著的调肥作用。适宜的土壤水肥条件能促进作物根系发育, 扩大根系与土壤的接触面积, 有利于增加养分吸收和矿质养分通过质流及扩散而运输, 从而提高作物吸收土壤矿质养分的强度和数量^[13]。汪耀富等^[14]的研究结果表明, 烤烟对氮素的利用效率和氮素增产率受氮素用量和灌水的影响, 适当增加氮肥用量和烟田灌溉都能明显提高烤烟对氮素的利用效率和氮素增产率, 从而证明水氮互作对提高烤烟氮肥利

收稿日期: 2008-10-16

作者简介: 陈 亚(1980-), 女, 河南商丘人, 在读硕士研究生, 研究方向: 植物营养与环境。

通讯作者: 袁 玲(1962-), 女, 重庆人, 教授, 博导, 主要从事农业化学、水资源与水环境研究。

用率具有明显作用。Hebbar 等^[15] 研究不同灌溉施肥模式下水肥耦合对番茄的影响, 结果表明, 滴灌施肥能明显促进根系生长, 提高 N、P、K 的吸收量, 减少深层土壤中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 K 的淋溶, 提高肥料利用率。Thomas 等^[16] 研究了地下滴灌水氮耦合对花椰菜氮肥吸收、硝酸盐残留以及氮肥利用率的影响, 3 年试验均表明, 施氮量显著影响氮肥利用率, 而土壤含水量也明显影响氮肥利用率。在低、中和高水条件下, 平均氮肥利用率分别为 55%、61% 和 52%, 施氮量为 $300 \sim 400 \text{ kg/hm}^2$ 的平均氮肥利用率为 58%, 而 $500 \sim 600 \text{ kg/hm}^2$ 的氮肥利用率仅为 41%, 高氮反而使氮肥利用率显著降低。Benjamin 等^[17] 研究隔沟灌溉带状施肥对玉米生长和氮肥吸收的影响, 结果表明, 在干旱条件下, 未灌水时, 氮肥吸收降低 50%, 在相对湿润条件下, 灌水和未灌水之间肥料吸收无差异。

在土壤中, 作物所需的营养元素只有溶在土壤水溶液中, 才容易被作物的根系吸收利用^[18, 19], 但是不同营养元素有不同的被吸收利用特性, 土壤溶液中一种养分浓度过高会影响或抑制作物对其他养分元素的吸收, 使作物不能平衡的吸收养分^[20]。有关水氮耦合对土壤中的磷、钾及其他矿质营养元素的吸收、运输及转移的影响研究还比较少。

1.3 水氮耦合对土壤水分的影响

研究表明^[21], 施肥能提高作物渗透调节能力, 尤其是增施氮肥可显著抑制蒸腾失水, 提高水分利用率, 而且, 施肥可以促进作物根系生长和冠层的发育, 扩大作物吸收水分和养分空间, 使作物可以吸收利用更多的土壤水分, 在总供水量不变或增加不大的情况下, 显著提高水分利用效率。水分利用效率 (water use efficiency) 是指作物消耗单位水分所产生的同化物质的量, 反映的是作物生产和水分之间的关系, 是评价作物生长适宜程度的综合生理生态指标^[22]。

任亚等^[19] 研究结果还表明, 在灌水量一定的条件下, 随氮肥用量增加, 烟田土壤含水量、土壤贮水量和水分产值率增大, 当氮用量达 67.5 kg/hm^2 时开始下降; 灌水与氮用量之间存在显著的互作效应, 灌水量在 $225 \sim 450 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 范围内, 施氮 $22.5 \sim 45.0 \text{ kg/hm}^2$ 既可满足烤烟生长的需要又可增强其对土壤水分的利用。而焦学梅等^[23] 在水氮耦合效应对贵州烟田土壤水分的影响的研究中发现, 氮用量在 $60 \sim 90 \text{ kg/hm}^2$ 时, 土壤各土层的含水量、贮水量、水分利用率、水分产值率随着氮用量的增加而增

加, 氮用量为 90 kg/hm^2 时, 水分利用率和水分产值率均达到最高, 分别为 $4126 \text{ 元}/(\text{mm} \cdot \text{hm}^2)$ 和 $28112 \text{ 元}/(\text{mm} \cdot \text{hm}^2)$; 氮用量在 $90 \sim 120 \text{ kg/hm}^2$ 时, 随着氮肥用量的增加, 烟田土壤含水量、土壤贮水量和水分产值率逐渐降低。刘晓宏等^[24] 试验表明, 在不同土壤水分条件下, 春小麦地上部分干重和籽粒的水分利用效率随施氮量的增加而增加, 尤以水分充足条件下水分利用率随施氮量的增加最为显著。

2 水氮耦合对作物生长及产质量的影响

2.1 水氮耦合对作物生长发育的影响

水氮耦合对不同作物的生长发育有不同的影响, 程宪国等^[25] 研究了不同水分条件下氮素对冬小麦生长发育及产量的影响, 结果显示, 水分缺乏, 养分的截获、质流和扩散均受到抑制, 加剧了作物生长过程中的营养不良状况; 养分不足, 作物生长缓慢, 有限的水分也不能充分利用。张岁岐等^[26] 研究不同氮肥处理对冬小麦叶面积和株高的影响时发现, 冬小麦的叶面积和株高随土壤含水量的下降而下降, 但不同氮素水平的反应并不完全相同, 干旱条件下, 施氮明显降低了冬小麦的根/冠比, 且随施氮量的增加而减小。翟丙年等^[27] 通过模拟试验研究发现, 冬小麦越冬期施氮与土壤含水量的交互作用比苗期施氮与土壤含水量的交互作用更为显著。凌寿方^[28] 研究认为, 在相同施氮条件下, 烟草在移栽后 $10 \sim 15 \text{ d}$ 与打顶前后各增施一次肥, 并配以水浇施, 既有利于中部叶的生长发育, 又有利于上部叶的充分展开, 改善了叶片结构, 明显提高了烟叶产质量。另外, 他还认为, 在总施氮量不变的情况下, 将 20% 肥料在移栽时施入, 在移栽后 10 d 及 20 d 各用 10% 对水浇施, 40% 肥料在移栽后 30 d 施入, 20% 移栽后 50 d 对水浇施效果最好, 而且烟叶内在品质协调。此外, 孙占祥等^[29] 研究表明, 氮肥用量与灌水量的交互作用与玉米的株高呈负相关, 而玉米的茎基宽与氮肥用量和灌水量呈正相关, 其中氮肥对茎基宽的影响最为明显, 灌水量次之。

总之, 不同作物在不同的生长发育期对不同水氮耦合处理有不同反映, 而同种作物不同品种之间也会存在不同的差异。

2.2 水氮耦合对作物生理特性的影响

水是植物生命活动的重要因素, 参与各种代谢活动, 而氮素是作物体内蛋白质、核酸、叶绿素、酶及激素等多种重要化合物的组成成分。因此, 水氮耦

合对作物的生理特性也有一定的影响。韩晓增等^[30]研究,在低剂量施用氮肥条件下,与土壤适宜水分条件相比较,大豆各生育期在土壤水分充足条件下,其光合效率提高,旱涝条件下光合效率均降低;旱与涝相比,旱比涝光合效率进一步降低。在适宜土壤水分条件下,提高氮肥施用量可以提高大豆的光合效率,在涝害发生时,过量施用氮肥使大豆光合效率降低;在干旱条件下,过量施用氮肥大豆光合效率进一步降低。而对蒸腾速率的影响表现为,与土壤适宜水分条件相比较,涝害大幅度提高了大豆蒸腾速率;充足土壤水分条件下大豆蒸腾速率略有提高;略旱使大豆蒸腾速率下降,特旱进一步降低了大豆蒸腾速率;在此基础上提高氮肥施用量可使大豆蒸腾速率进一步增加或降低。郭天财等^[31]认为,水氮运筹对小麦旗叶净光合速率、叶绿素荧光参数及产量性状均具有明显的调控效应,其中灌水效应明显大于施氮效应,而且水、氮处理间存在显著互作效应。熊江波等^[32]在烤烟方面的研究结果表明,在相同施氮条件下,各生育时期叶绿素含量随土壤含水量增大而提高;在同一水分条件下,叶绿素含量随氮肥用量增加而增加;旺长期和现蕾期水氮有明显交互作用,112.5 kg/hm²氮肥和60%~70%的土壤含水量组合效果最好,叶绿素含量最高;成熟期水氮交互效应不明显。

2.3 水氮耦合对作物产量的影响

水肥耦合对作物产量的影响主要反映在水肥供应水平上,不同肥水条件下,作物的产量表现不同。在水肥不足的情况下,补充水分可增加产量,施肥的增产效果大于水分的增产效果;当土壤自然肥力水平低时,施肥的增产效果显著,而随着自然肥力提高,水分作用越来越大,并且水肥对产量有耦合效应;灌水量少时,水肥的交互作用随肥料用量增高而增高,灌水量高则有相反趋势。水肥耦合存在阈值反应,低于阈值,增加水肥投入增产效果明显,高于阈值,增产作用不大^[33]。

水和氮不仅是作物生长发育的重要环境因子,而且是作物产量形成的重要组成元素。Shimshi^[34]指出,水分和氮素的供应对植物生产的共同影响,可以用李比希的最低因子定律求出近似值。把水分限制下的作物生物量(YW)与氮素限制下的作物生物量(YN)加以对比,降雨量低于200 mm时, $YW < YN$,作物的生物量主要受水分供应的限制;降雨在200~400 mm范围内, $YW > YN$,作物的生物量主要受氮素供应的限制。裴宇峰等^[35]的试验结果显

示,不同生育期,水氮耦合对大豆产量影响程度不同,最敏感时期为结荚期。在土壤水分适宜和充足时,水氮耦合表现为顺序加和;土壤特涝时,水氮耦合表现为互为拮抗作用;土壤略旱时,水氮耦合表现为限制性的协同作用;当土壤特旱时,水氮耦合不起作用,具体表现为,在大豆4个生育期产量均为充足水分+高氮产量最高,与对照相比,增产分别为14.3%、24.3%、33.4%和12.5%;特旱+低氮产量最低,分别减产14.1%、39.3%、41.2%和33.1%。郭亚芬等^[36]研究结果显示,在土壤含水量较大时,较小的施氮量就使大豆产量达到较高值,再增加氮肥施用量,大豆产量就会随着氮肥施用量的增加而降低;而大豆产量最高值出现在氮肥用量水平最高时。表明较大的土壤含水量情况下,大豆产量是在更高产量的基础上随着氮肥施用量的增加而变化的。汪耀富等^[14]研究指出,在不灌水条件下适当增加氮素用量和在相同施氮水平下充分灌水,都可以显著提高烟叶产量,改善烟叶的经济性状和化学成分,表明灌水和氮用量之间存在显著的正向交互作用。孙占祥^[29]等的试验研究也表明,氮肥和灌水量对玉米产量均具有正效应,且符合报酬递减定律,过量施肥、灌水会引起明显的负效应,造成玉米减产。

2.4 水氮耦合对作物品质的影响

许多研究表明,不适当的施肥对土壤环境、水环境、大气环境及农产品品质均会产生不良影响^[37]。当氮肥大量施入农田时,在通气良好的旱地土壤上,施入的氮素经过硝化作用变成硝态氮进入植物体后,过量的氮素将以硝态氮的形态留存于植物体内,造成农产品品质下降^[38]。王晨阳等^[39]的研究结果表明,水氮运筹显著影响小麦淀粉含量及组成,随施氮量增加,直链淀粉含量及直/支比均呈下降趋势,表明增施氮肥有利于改善中筋和强筋小麦面粉的面条加工品质;在限量灌水条件下,灌水有利于增加支链淀粉和总淀粉含量,降低淀粉直/支比。从灌水与施氮对淀粉影响的效应看,对直链淀粉而言,施氮效应大于灌水效应,而对支链淀粉和总淀粉含量则是灌水效应大于施氮效应。王立秋等^[40]的研究结果表明,增加灌水会降低小麦籽粒品质,对烘烤品质有一定的稀释作用,但这种稀释作用可以通过施肥得以缓解,一定的水肥措施可以改善面包体积和比容。增加灌水可能会降低小麦籽粒品质,其原因可能是灌水促进了淀粉的合成与积累,使蛋白质积累相对降低。但灌水量和施肥量对小麦品质的影响有明显的互作效应,增加施肥量可使这种稀释效应得以缓

冲和补偿。吴金芝等^[41]的试验证明,若把灌溉与增施氮肥相结合,则小麦籽粒产量和蛋白质含量同时增长,或至少蛋白质含量不下降。裴宇峰等^[35]试验结果也显示,干旱和高氮有利于大豆蛋白质的合成,不利于脂肪的合成。

3 目前研究存在的问题

水肥是作物生长的主要限制因子^[42,43]。但在作物生产中对水肥资源利用不合理,不仅浪费水肥资源,而且影响环境,因此,对水肥施用技术的研究日益受到重视^[44~48],以往的大量研究工作取得了不少成果,但目前研究中还存在一些问题:首先,大多数研究都注重水氮耦合对作物生长发育、产量和品质的影响,也得出了不少比较成熟、统一的结论,但对生理特性的研究还不够深入,比如,植物激素对植物生长发育有显著的调节作用,有些激素在作物抗逆中起着重要作用,水氮耦合如何具体影响作物内源激素,有必要加强这方面的研究。其次,水氮耦合对作物体内重要酶的影响研究也比较少,如在作物体内对氮素代谢起重要调节作用的硝酸还原酶和作物处于逆境下起重要作用的保护酶系统。第 3,大多数研究都注重水氮耦合对作物本身的研究,对土壤影响的研究还比较少。例如,水氮耦合情况下,对矿质元素磷、钾和其他矿质元素的吸收、运输和转化的具体影响;水氮耦合对土壤 pH 值及土壤微生物群落结构的影响。第 4,与大田作物相比,蔬菜生产具有施肥量高和灌溉强度大的显著特点,氮淋失也更为严重,有必要进一步加强在保护设施地生产中水氮耦合对作物的影响研究,确立最佳水氮耦合模式,从而通过人工调控,优化栽培措施,改善土壤理化性状,提高作物产量品质。第 5,目前,旱作农田水肥耦合效应的研究主要采用田间试验和模拟试验(旱棚试验或盆栽试验)进行,保护地蔬菜水肥耦合效应的研究大多采用小区滴灌模拟试验的方法。每种方法各有优缺点,但由于众多学者的研究方法不同,已有的一些理论和水肥定量还有待进一步统一。

参考文献:

- [1] 汪德水. 旱地农田肥水协同效应与耦合模式[M]. 北京: 气象出版社, 1999: 30—40.
- [2] 李生秀, 李世清, 高亚军, 等. 施用氮肥对提高旱地作物利用土壤水分的机理和效果[J]. 干旱地区农业研究, 1994, 12(1): 38—46.
- [3] 徐学选, 陈国良, 穆兴民. 水肥对春小麦产量的效应研究[J]. 干旱地区农业研究, 1995, 13(2): 34—48.
- [4] Power J E. Nitrate contamination of ground-water in north America[J]. Agron Ecosys Environ, 1989, 26: 165—187.
- [5] 张维理, 田哲旭, 张宁, 等. 我国北方农用氮肥造成地下水硝酸盐污染的调查[J]. 植物营养与肥料学报, 1995, 1(2): 80—87.
- [6] Kessavalou A, Doran J W, Power W L, et al. Biomide and nitrogen-15 tracers of nitrogen leaching under irrigated corn in central Nebraska[J]. J Environ Qual, 1996, 25: 1008—1014.
- [7] Timmons d R, Dylla A L. Nitrogen leaching as influenced by nitrogen management and supplemental irrigation level[J]. J Environ Qual, 1981, 10: 421—426.
- [8] 梁运江, 依艳丽, 许广波, 等. 水肥耦合效应对保护地土壤硝态氮运移的影响[J]. 农村生态环境, 2004, 20(3): 32—36.
- [9] 刘微, 赵同科, 王丽英. 不同水分、施氮量对土壤中硝态氮含量分布的影响[J]. 华北农学报, 2006, 21(3): 27—30.
- [10] 周娜娜, 王刚. 水肥耦合条件下马铃薯产量和 NO_3^- -N 动态变化研究[J]. 琼州大学学报, 2005, 12(5): 54—56.
- [11] 李法云, 宋丽, 郑良, 等. 水肥耦合作用对土壤养分变化及春小麦生长发育的影响[J]. 辽宁大学学报: 自然科学版, 2001, 28(3): 363—267.
- [12] Canadela L. Diffused pollution of ground water by agriculture; a study in the Maresme area of ardona [M]. Spain Proc Int Conf Environ Pollute, 1991: 161—169.
- [13] 桑以琳. 土壤学与农作物学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005: 130—131.
- [14] 汪耀富, 孙德梅, 李群平, 等. 灌水与氮用量互作对烤烟叶片养分含量、产量、品质及氮素利用效率的影响[J]. 河南农业大学学报, 2006, 37(2): 119—123.
- [15] Hebbar S S, Ramachandrappa B K J, Nanjappa H V. Studies on NPK drip irrigation in field grown tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill)[J]. European Journal of Agronomy, 2004, 21(1): 117—127.
- [16] Thomas L T, Thomas A. Nitrogen and water interactions in sub-surface drip-irrigated cauliflower-soil[J]. Science Society of America Journal, 2000, 64: 412—418.
- [17] Benjamin J G, Porter L K, Duke H R. Corn growth and nitrogen up-take with furrow irrigation and fertilizer bands[J]. Agron J, 1997, 89(4): 609—612.
- [18] 苏德纯, 王兴仁, 周壮志, 等. 长期施磷对土壤磷空间分布及磷素平衡的影响[C] // 中国土壤学会、中国植物营养与肥料学会. 第六届全国青年土壤暨首届全国

- 青年植物营养科学工作者学术讨论会论文集. 北京: 中国农业出版社, 1997: 163—167.
- [19] 任亚, 汪耀富, 刘占卿, 等. 水氮耦合对烟田土壤水分时空分布和利用效率的影响[J]. 中国农学通报, 2005, 21(4): 194—197.
- [20] Sharma B D. Yield, water use and nitrogen up-take for different water and N levels in winter wheat[J]. Technology, 1990, 101—105.
- [21] 汪德水. 旱地农田肥水协同效应与耦合模式[M]. 北京: 气象出版社, 1999: 123—126.
- [22] 张忠学, 曾赛星. 东北半干旱抗旱灌溉区节水农业理论与实践[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005: 286—287.
- [23] 焦学梅, 钱晓刚, 廖勇. 水氮耦合效应对贵州烟田土壤水分的影响[J]. 山地农业生物学报, 2007, 26(3): 207—210.
- [24] 刘晓宏, 肖洪浪, 赵良菊. 不同水肥条件下春小麦耗水量和水分利用率[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(1): 56—59.
- [25] 程宪国, 汪德水, 张美荣, 等. 不同土壤水分条件对冬小麦生长及养分吸收的影响[J]. 中国农业科学, 1996, 29(4): 71—74.
- [26] 张岁岐, 山仑, 薛青武. 氮钾营养对小麦水分关系的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2000, 6(2): 147—151.
- [27] 翟丙年, 李生秀. 冬小麦产量的水肥耦合模型[J]. 中国工程科学, 2002, 4(9): 69—74.
- [28] 凌寿方. 不同施肥方式及水肥调控对烟叶产质量的影响[J]. 烟草农业科学, 2006, 2(1): 82—86.
- [29] 孙占祥, 孙文涛. 水肥互作对玉米生长发育及产量的影响[J]. 沈阳农业大学报, 2005, 36(3): 275—278.
- [30] 韩晓增, 裴宇峰, 王守宇, 等. 水氮耦合对大豆生长发育的影响II. 水氮耦合对大豆生理特征的影响[J]. 大豆科学, 2006, 25(2): 103—107.
- [31] 郭天财, 姚战军, 王晨阳, 等. 水肥运筹对小麦旗叶光合特性及产量的影响[J]. 西北植物学报, 2004, 24(10): 1786—1791.
- [32] 熊江波, 陈文芳, 肖金香. 水肥交互作用对烤烟叶绿素含量的影响[J]. 江西农业学报, 2007, 19(6): 77—79.
- [33] 肖自添, 蒋卫杰, 余宏军. 作物水肥耦合效应研究进展[J]. 作物杂志, 2007(6): 18—22.
- [34] Shimshi D. The effect of N on some indices of plant-water relations of beans [J]. New phytol, 1970, 69: 413—424.
- [35] 裴宇峰, 韩晓增, 祖伟. 水氮耦合对大豆生长发育的影响I. 水氮耦合对大豆产量和品质的影响[J]. 大豆科学, 2005, 24(2): 106—111.
- [36] 郭亚芬, 滕云, 张忠学, 等. 东北半干旱区大豆水肥耦合效应试验研究[J]. 东北农业大学学报, 2005, 36(4): 406—411.
- [37] 王继红, 刘景双, 于君宝, 等. 农田生态系统氮、磷肥的环境效应[J]. 吉林农业大学学报, 2003, 25(3): 327—331.
- [38] 于亚军, 李军, 贾志宽, 等. 旱作农田水肥耦合研究进展[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(3): 220—224.
- [39] 王晨阳, 马冬云, 郭天财, 等. 不同水、氮处理对小麦淀粉组成及特性的影响[J]. 作物学报, 2004, 30(8): 739—744.
- [40] 王立秋, 靳占忠, 曹敬山, 等. 水肥因子对小麦籽粒及面包烘烤品质的影响[J]. 中国农业科学, 1997, 30(3): 67—73.
- [41] 吴金芝, 李友军, 郭天财. 小麦籽粒蛋白质品质的肥水调控技术研究现状[J]. 河南科技大学学报: 农学版, 2003, 6(3): 8—11.
- [42] Gan Y T, Lafond G P, May W E. Grain yield and water use; relative performance of winter VS. spring cereals in east-central Saskatchewan[J]. Canadian Journal of Plant Science, 2000, 8(5): 33—41.
- [43] 王小彬, 高绪科, 蔡典雄. 旱地农田水肥相互作用的研究[J]. 干旱地区农业研究, 1993, 11(3): 6—11.
- [44] Karasov V G. Irrigation efficiency in water delivery [J]. Technology, 1982, 2: 62—74.
- [45] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策[J]. 土壤与环境, 2000, 9(1): 1—6.
- [46] Terry A Howell. Enhancing water use efficiency in irrigated agriculture[J]. Agronomy Journal, 2001, 93: 281—289.
- [47] 文宏达, 刘玉柱, 李晓丽, 等. 水肥耦合与旱地农业持续发展[J]. 土壤与环境, 2002, 11(3): 315—318.
- [48] Sylvain Pellerin, Alain Mollier, Daniel Plenet. Phosphorus deficiency affects the rate of emergence and number of maize adventitious nodal roots[J]. Agronomy Journal, 2000, 92: 690—697.