

限水灌溉下不同氮肥用量 对小麦产量及氮素分配利用的影响

李世娟¹, 周殿玺², 李建民²

(1. 中国农科院, 北京 100081; 2. 中国农业大学 农学系, 北京 100094)

摘要: 研究了限水灌溉下不同氮肥用量对冬小麦产量和氮素分配利用的影响。结果表明: 氮肥利用率随氮肥量的递增而降低, 施 225 kg/hm² 纯氮处理达到最高产量, 在此基础上增施氮肥产量下降; 随着施氮量的增加, 植株体内的氮素较多地分配于营养器官, 地上部器官叶片占的比例最大, 而收获指数依次降低。

关键词: 限水灌溉; 氮肥; 产量; 氮素利用

中图分类号: S143.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-7091(2001)03-0086-06

水分和养分是农业生产中两个紧密相连的因素, 作物对养分的吸收、运转和利用都依赖于土壤水分, 土壤的水分状况在很大程度上决定着肥料的合理用量。早期的研究多侧重于水肥单方面的增产效应, 如因水资源短缺而进行的一系列节水研究^[1, 2], 以及关于小麦营养吸收特性方面的研究^[3]。近年来国内外相继开展了水肥交互效应的研究^[4-6], 结果表明, 小麦生产中水肥之间存在明显的交互作用, 但由于试验方法、试验地域以及栽培条件等多方面的差异, 关于两者相互影响的具体表现说法不一, 并且缺乏限水灌溉条件下氮肥吸收利用方面的研究。

水资源紧缺严重影响着我国旱区农业的持续发展, 尤其华北地区是我国旱区面积最大的地区, 北方旱区干旱面积每年都有 $0.13 \times 10^8 \sim 0.27 \times 10^8$ hm², 搞节水栽培提高旱地冬小麦产量是我国粮食生产的一个重要课题。目前关于冬小麦限水灌溉下肥料的吸收、运转及合理的肥料运筹尚不清楚, 我们在大田中进行了限水灌溉下不同氮肥用量试验, 研究限水灌溉对冬小麦氮素分配利用及产量的影响, 以期节水灌溉下氮肥的合理用量提供依据。

1 材料和方法

试验地块设在河北省吴桥县, 土壤类型为中壤土。试验地耕层全氮含量 5.6 mg/g, 有机质含量 10.1 mg/g, 有效磷(P) 7.48 mg/kg, 速效钾(K) 74.86 mg/kg。试验地块 2 m 土体的贮水能力为 640 mm, 其中有效贮水量为 420 mm。田间持水量的水分含量为 21.68%, 凋萎系数为 7.59%。年间及年内降雨变化较大且分布不均, 年平均降雨 562 mm, 属于严重缺水地区。选用 3 种有代表性的土壤质地, 在室内用压力膜法测定的土壤水分特征曲线如表 1 所示。冬小麦品种为 76 选系。

收稿日期: 2000-01-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(39570437)

作者简介: 李世娟, (19 -), 女, 讲师, 农学博士, 主要从事冬小麦节水高产栽培研究。

表 1 土壤水分特征曲线实测值（压力膜法）θ v %

基质势(kpa)	1. 0	10	30	50	100	300	700	1 000	1 500
砂壤	37. 98	36. 33	25. 64	23. 87	17. 69	14. 92	14. 81	12. 37	8. 84
轻壤	36. 86	36. 07	26. 42	25. 67	19. 97	19. 43	19. 11	18. 74	10. 82
重壤	42. 64	41. 64	35. 10	32. 99	27. 25	27. 22	25. 90	23. 16	15. 59

试验设计为单因素随机区组设计。共设 6 个氮肥水平，包括N₀(0 kg/hm² 纯氮)、N₇₅(75 kg/hm² 纯氮)、N₁₅₀(150 kg/hm² 纯氮)、N₂₂₅(225 kg/hm² 纯氮)、N₃₀₀(300 kg/hm² 纯氮)、N₃₇₅(375 kg/hm² 纯氮)。小区面积 40 m²，3 次重复，随机排列。各处理有机肥(11 250 kg/hm²)，磷肥(225 kg/hm² 磷酸二铵)、钾肥(150 kg/hm² 硫酸钾)一致，做底肥一次性施入，氮肥底施 50%，拔节期追施 50%。处理间灌水一致。试验地播种前浇足底墒水，拔节、开花期各灌一水，灌水量分别为 50. 8 mm 和 30. 4 mm，浇水前后取土测定土壤水分确定灌水量。小麦整个生育期间降雨 144. 3 mm。由于 5 月份连续阴天，导致赤霉病的发生。

于小麦主要生育时期取植株样品和土壤样品，烘干法测定干物质积累量及各层次土体贮水量。收获后常规考种，各小区单收计算产量及经济系数；植株干样全氮测定采用凯氏定氮法。

2 结果与分析

2.1 限水灌溉下不同氮肥处理对产量及水肥利用率的影响

2.1.1 产量与产量结构 由表 2 可以看出，小麦产量随氮肥用量的加大而提高，N₂₂₅处理达最高产量 6 466. 5 kg/hm²，超过这一施肥量，产量下降，理论产量与实际产量变化趋势相同。仔细分析产量结构如下：由于节水技术采取晚播措施，小麦基本依靠主茎成穗，各处理间由穗数相差不大；N₀(对照)和 N₇₅两处理肥力较低，植株生长偏弱，影响小花的结实率，穗粒数减少，而 N₁₅₀水平以上各处理穗粒数变化不大；本试验限水灌溉下不同氮肥量对千粒重影响最大，随氮肥量递增，千粒重大体呈下降趋势，这是由于氮肥量越高的处理，氮素在营养器官尤其叶片中的比例越高，叶绿素含量越高，导致成熟前物质的转移不充分，干物质大量滞留于营养器官。N₀和 N₇₅处理因为穗粒数较少，即库少，并且开花以后物质转移比较充分，所以千粒重最高。

表 2 不同氮肥处理的产量结果

处理	穗数 (万/hm ²)	穗粒数 (粒/穗)	千粒重 (g)	理论产量 (kg/hm ²)	实际产量 (kg/hm ²)
N ₀	528. 0	19. 4**	39. 7**	4 066. 6	3 376. 5**
N ₇₅	564. 0	22. 5**	40. 7*	5 164. 8	5 188. 5
N ₁₅₀	565. 5	30. 3	38. 4	6 579. 7	6 367. 5
N ₂₂₅	567. 0	30. 6	38. 8	6 731. 9	6 466. 5
N ₃₀₀	562. 5	30. 8	37. 9	6 566. 2	6 235. 5
N ₃₇₅	561. 0	30. 8	37. 7	6 514. 1	6 063. 0

注：* 表示在 0. 05 概率水平上显著差异；** 表示在 0. 01 概率水平上极显著差异，下同

2.1.2 限水灌溉下不同氮肥处理的水肥利用效率 由表 3 中各处理耗水结果看出, 随施氮肥量的提高, 每公顷耗水量有递增的趋势, 按照氮肥量递增顺序, 后一施肥量的耗水量比前一施肥量分别增加 4.7%, 8.3%, 2.2%, -2.6%, 2.9%, 即每公顷施 150 kg 纯氮以上的处理间耗水量差别不大, N₃₀₀处理甚至比 N₂₂₅处理降低了 2.6%。随施肥量递增各处理水分利用率依次为: 10.62^{*}, 15.59, 17.67, 17.56, 17.38 和 16.42 kg/mm, 水分利用效率以 N₁₅₀处理最高, 此后随氮肥量增加而逐渐降低, N₃₇₅处理的水分利用率比 N₁₅₀处理降低了 5%, 比 N₂₂₅处理降低了 4.4%。可见本试验限水灌溉下 225 kg/hm² 纯氮即可达到较高的耗水量和水分利用率, 氮肥量过高或者过低都会降低小麦对水分的利用效率, 所以限水灌溉下氮肥用量要适宜。

氮肥当季利用率表示小麦植株吸收当季肥料氮的能力。我们认为评价作物对氮素的吸收利用, 不能仅仅看当季利用率, 还要看吸收的氮素形成产量的能力, 即氮素生理效率, 只有把两者结合起来才够全面。本试验结果表明, 随氮肥梯度的增加, 氮肥当季利用率、生理效率都呈下降趋势, 两者的乘积依次为 31.78 (N₇₅), 25.15 (N₁₅₀), 18.22 (N₂₂₅), 12.49 (N₃₀₀), 9.62 (N₃₇₅), 即随氮肥量递增, 也呈明显的下降趋势, 这说明本试验条件下, 氮肥量越大, 小麦形成产量的能力越低。

表 3 不同氮肥处理的水肥利用效率

处理	纯氮用量 (kg/hm ²)	吸氮量 (kg/hm ²)	产量 (kg/hm ²)	氮肥利用率 (%)	N 生理效率 (kg/kg)	耗水量 (mm)	水分利用率 (kg/mm)
N ₀	0	60.0	3 376.5	/	56.28	317.8	10.62 ^{**}
N ₇₅	75	111.0	5 188.5	68.00	46.74	332.8	15.59
N ₁₅₀	150	147.2	6 367.5	58.13	43.26	360.4	17.67
N ₂₂₅	225	164.0	6 466.5	46.22	39.43	368.2	17.56
N ₃₀₀	300	150.3	6 235.5	30.10	41.49	358.8	17.38
N ₃₇₅	375	148.2	6 063.0	23.52	40.91	369.2	16.42

2.2 限水灌溉下不同氮肥处理氮素的吸收利用及分配情况

2.2.1 小麦整株含氮率的变化动态 在小麦植株拔节一成熟期间, 由于干物重的增长速度较大, 植株含氮率随生育进程的推进而逐渐降低, 拔节期的含氮率最高(表 4)。同一生育期内, 植株含氮率的变化趋势不同, 孕穗期以前, 整株含氮率随氮肥量增加而提高, 即氮肥吸收速度超过了干物重增长; 开花期 N₃₇₅

处理首先出现含氮率低于前面的氮肥水平, 到成熟期 N₃₀₀、N₃₇₅两处理整株含氮率都低于氮肥水平为 N₂₂₅的处理。这种氮肥施用量超过一定量(225 kg/hm²)以后, 植株含氮率降低的现象, 主要由于孕穗以后郁蔽较严重, 加上病害影响植株正常生长, 导致植株吸氮量降低, 并且幅度超过了干重的降低。

表 4 不同氮肥处理主要时期植株含氮率的变化 %

处理	拔节期	孕穗期	开花期	成熟期
N ₀	1.735	1.169	1.068	0.811
N ₇₅	2.472	2.200	1.527	1.121
N ₁₅₀	3.062	2.595	1.864	1.265
N ₂₂₅	3.058	2.758	1.934	1.302
N ₃₀₀	3.162	2.647	2.134	1.282
N ₃₇₅	3.058	2.787	2.026	1.262

2.2.2 限水灌溉对不同氮肥处理的氮素转移和分配的影响

(1) 限水灌溉下不同氮肥处理的累积吸氮量 从表 2 可以看出，氮肥量较低时植株吸氮量随氮肥用量的增加而增加，N₂₂₅处理吸氮量最高(163.95 kg/hm²)，产量也达最高(6 466.5 kg/hm²)，此后再增加氮肥量，植株吸氮量和产量反而下降。可见在本试验肥料运筹下，过高或过低的氮肥用量都不利于小麦对氮素的吸收，限水灌溉条件下施氮量与小麦吸氮量并非成一简单的直线相关关系，盲目增施氮肥不一定能提高产量。

(2) 限水灌溉下不同氮肥处理的氮素分配比例 水分亏缺可以改变氮素在植株体内的分配模式，氮素的分配方向因作物而异，氮素优先供应根部的较多，也有向叶片等部位分配增加的报道。本试验中从表 5 各器官的吸氮量看，子粒最高，叶片次之，其余三者(叶鞘、茎秆、颖壳)相差不大，各器官氮素累积量随氮肥量递增而逐渐增加，N₂₂₅处理以后稍有下降。从各器官的氮素分配比例来看，随氮肥用量的提高，氮素收获指数呈下降趋势，即分配于茎秆等营养器官的比例增大，并且随氮肥用量加大，各器官滞留氮素的比例越高，营养器官中叶片含氮占有较大比例。可见氮肥用量不适宜，会引起子粒含氮量和含氮率的降低。总之，氮肥过多不利于氮素向子粒运转，而转向叶片、茎秆等营养器官。

表 5 不同氮肥处理各器官的氮素分布

器 官	项 目	处 理					
		N ₀	N ₇₅	N ₁₅₀	N ₂₂₅	N ₃₀₀	N ₃₇₅
叶片	吸氮量(kg/hm ²)	4.20	8.70	13.80	18.75	17.55	17.40
	比例(%)	7.04	7.83	9.37	11.43	11.67	11.69
叶鞘	吸氮量(kg/hm ²)	2.10	4.65	7.65	9.45	9.60	10.80
	比例(%)	3.52	4.18	5.19	5.76	6.38	7.26
茎秆	吸氮量(kg/hm ²)	4.05	5.25	8.10	9.90	9.30	9.00
	比例(%)	6.78	4.72	5.50	6.03	6.18	6.05
穗轴+ 壳	吸氮量(kg/hm ²)	3.45	6.00	7.20	8.10	7.95	7.20
	比例(%)	5.78	5.40	4.89	4.94	5.28	4.84
子粒	吸氮量(kg/hm ²)	45.90	86.55	110.55	117.90	106.05	104.40
	比例(%)	76.88	77.87	75.05	71.85	70.49	70.16

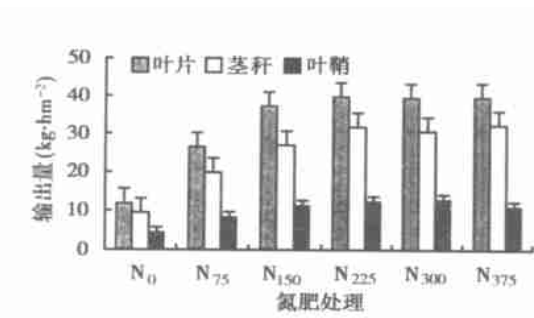


图 1 各器官的氮素输出量

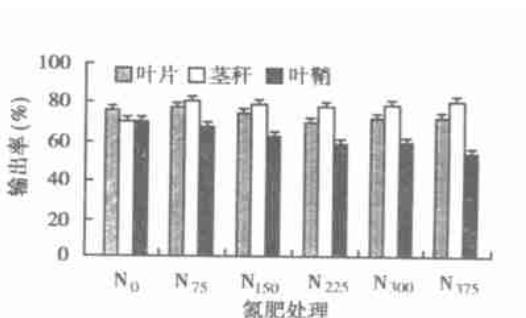


图 2 各器官的氮素输出率

(3) 开花后不同处理各器官的氮素转移量 开花后的物质转移量在产量中占有很大比例。尽量实现物质的最大转移，是经济施肥的目的之一，而要确定转移程度，各器官的输出率是至关重要的。由图 1、2 可看出，随施氮肥量的增加，叶片、叶鞘和茎秆的氮素绝对输

出量有递增的趋势(图1), N_{225} 氮素水平以上的处理间输出量已相差不大, 但从氮素输出率来看(图2), 叶片、茎秆的输出率处理间并无大的差异, 并且叶鞘的氮素输出率随氮肥量增加有很明显的降低趋势。高氮处理由于较低的转移率, 氮素滞留于营养器官, 造成了不必要的物质浪费。高氮处理转移率低的原因可能是成熟时各器官生理功能尚较强, 有一部分氮要用于自身的代谢, 所以输出率降低。

植株开花后根系活力开始下降, 花后仍有相当量的氮素吸收是根系活力强、植株健壮的表现, 随氮肥量增加, 花后氮素吸收量降低, 尤其 N_{300} 、 N_{375} 处理降低更多, 比对照低 50% ~ 55% (N_0 : 10.725 kg/hm², N_{300} : 5.385 kg/hm², N_{375} : 4.875 kg/hm²)。其中的原因有待于进一步研究。

2.3 限水灌溉条件下的氮肥经济效益分析

随氮肥量递增, 边际产量递减, 边际效益依次为 24.16, 15.72, 1.32, -3.08, -2.3, 可见在施 225 kg/hm² 纯氮基础上再增施 75 kg 氮时, 边际效益出现负值。增施肥料的目的是获得较高的产量和纯收益, 本试验中随氮肥量递增, 纯收益依次为 2316.3, 3746.4, 3664.5, 3120.6, 2658.6, 即在 N_{150} ~ N_{225} 施肥水平范围内收益较高。经统计分析, 产量与施氮量之间呈二次曲线关系:

$$Y = -0.7411X^2 + 24.878X + 233.27 (r = 0.9695^{**})$$

由以上肥效方程, 得到最佳经济施肥量为 230.55 kg/hm², 此时产量是 6609.45 kg/hm², 这一产量与 N_{225} 处理的理论产量很接近。由此可见, 本试验土壤条件及肥料运筹下, 采取限水灌溉时的氮肥适宜用量为 230.55 kg/hm² 左右, 这时可达到最高的经济效益。

3 讨论

土壤水分条件是影响氮肥吸收与损失的重要因素之一。充分灌溉条件下, 冬小麦的吸氮规律及肥料运筹已做过大量研究, 近几年研究表明, 氮肥和水分有明显的互作效应^[7,8]: 缺水情况下小麦产量和氮肥肥效相应降低, 水分供应充分, 则需要相应提高氮肥量, 否则会降低水分利用率。可以看出, 这些研究多侧重于水分利用率和氮素利用率的相互影响及两者对产量本身的共同影响, 有的学者通过回归等统计手段得出不同水分条件下的氮肥用量, 但终因其地域局限性较大, 使用范围受到限制。本试验在前人研究的基础上, 深入研究限水灌溉下冬小麦对氮素的吸收利用情况。

结果表明: 不同氮肥用量处理间冬小麦千粒重差异最大; 使用氮肥可以提高产量, 以 225 kg/hm² 处理达最高产量; 总收益以 150~225 kg/hm² 水平间较高, 300 kg/hm² 处理边际效益开始出现负值; 通过肥料效应方程得到当地最佳氮肥用量为 230.55 kg/hm²。

进一步分析收获时小麦植株各器官的氮素分布及分配情况表明, 随氮肥量提高, 氮素收获指数降低, 营养器官中的滞留氮量增加(其中以叶片比例最高), 这是影响氮肥利用率的一个重要因素。这和以往学者的研究有相似之处。王小彬等研究认为, 水分不足时氮素向子粒的转移受限, 而是趋于在基叶和根部中累积, 子粒含氮量相对减少^[6]。同时当氮肥用量高于 225 kg/hm² 时, 耗水量不再增加, 而地块并无旱情, 这可能说明本试验灌足底墒水前提下, 81 mm 左右的水量已基本满足限水灌溉小麦一生的需水量, 氮肥量过高或过低, 都会

降低水分利用率。

总之, 本试验限水灌溉下, 施氮 225 kg/hm^2 处理达到较高的产量, 开花后营养器官向子粒的氮素转移较充分, 获得较高的水分利用率和氮素当季利用率, 并与肥效方程的最佳施肥量吻合, 所以初步确定本试验条件下的合理氮肥用量为 225 kg/hm^2 左右。

参考文献:

- [1] 石元春. 节水农业应用基础研究进展[M]. 北京: 中国农业出版社, 1995. 156– 163.
- [2] 兰林旺, 周殿玺. 小麦节水高产研究[M]. 北京: 北京农业大学出版社, 1995.
- [3] 张继林, 孙元敏, 郭绍铮, 等. 高产小麦营养生理特性与高效施肥技术研究[J]. 中国农业科学, 1988, 21(4): 39– 45.
- [4] 李生秀, 赵伯善. 旱地土壤的合理施肥 III 旱地施肥与土壤供水[J]. 干旱地区农业研究, 1993, 11(增刊): 13– 18.
- [5] 金 轲, 汪德水, 蔡典雄, 等. 水肥耦合效应研究 I. 不同降雨年型对 N、P、水配合效应的影响[J]. 植物营养与肥科学报, 1999, 5(1): 1– 7.
- [6] 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– 12.
- [7] 苗果园, 尹 钧, 高志强, 等. 旱地小麦降水年型与氮素供应对产量的互作效应与土壤水分动态的研究[J]. 作物学报, 1997, 23(3): 263– 271.
- [8] 介晓磊, 韩燕来, 谭金芳, 等. 不同肥力麦田水氮交互效应与耦合模式研究[J]. 作物学报, 1998, 24(6): 963– 970.

Effect of Different Nitrogen Application on Yield, Nitrogen Distribution and Utilization in Winter Wheat Under Soil Water Stress

LI Shi-juan¹, ZHOU Dian-xi², LI Jian-min²

(1. Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;

2. China Agricultural University, Beijing 100094, China)

Abstract: The field experiment on effect of different nitrogen application on yield, nitrogen distribution and utilization in winter wheat under water stress has been processed in Hebei province where is serious dry area from 1997 to 1998. The results show that with the increase of N application, nitrogen utilization efficiency decreased, the treatment (225 kg/ha) arrived the highest yield, and the yield of other treatments applied over the rate decreased. With the increase of N application, N absorbed was mainly distributed in nutrition organs of plants in which leaf had the biggest ratio. At the same time the harvest index declined in turn.

Key words: Water stress; Fertilizer; Yield; Nitrogen utilization