

水氮耦合对春小麦干物质累积与植株氮素转运的影响

梁伟琴¹ 贾莉² 郭黎明¹ 李应兰³ 胡亚峰¹ 陈小花¹ 马旭凤¹ 李静¹

(¹定西市安定区农业技术推广服务中心, 743000, 甘肃定西; ²定西市农业技术推广站, 743000, 甘肃定西; ³定西市安定区农业广播电视学校, 743000, 甘肃定西)

摘要 为明确甘肃中部地区春小麦合理的施氮水平和灌水量, 以陇春 27 为研究对象, 以灌水量[1000 (W1)、2000 (W2) 和 3000 m³/hm² (W3)]为主区, 施氮量[0 (N0)、80 (N1)、160 (N2) 和 240 kg/hm² (N3)]为副区, 研究水氮对小麦干物质累积、氮含量、氮素累积及产量的影响。结果表明, 不同施氮量和灌水量对小麦干物质累积量、氮累积量、籽粒产量及氮转运均有显著影响, 且存在互作效应; 各生育期小麦干物质累积量随灌水量与施氮量的增大呈增大趋势, 灌水量对干物质累积量影响大于施氮量; 茎和叶氮含量随施氮量增大而增大, 氮含量为籽粒>叶>颖壳>根>茎, 灌水处理对小麦营养器官氮含量影响小于施氮处理; 随灌水量与施氮量增大, 小麦各器官氮累积量呈先增大后减小趋势; 籽粒氮累积量与产量以 W2N2 处理最大, 适宜的水氮供给有利于干物质从营养器官向生殖器官转移, 从而提高籽粒产量和氮素生产效率。综上, 灌水量与施肥量分别在 2000 m³/hm² 和 160 kg/hm² 时有利于小麦生产。

关键词 小麦; 水氮应用; 干物质累积; 氮累积; 产量

甘肃省中部地区年均降雨量 350~600 mm, 而蒸发量则高达 1400 mm 以上, 干旱是制约当地农业生产的主要因素, 合理的灌溉利于农作物的生长及产量形成, 又能降低水资源的浪费。农业灌水技术日新月异, 水利设施不断完善, 同时盲目灌水现象日益突出。调查发现, 甘肃省内一些地区冬前封冻水灌水高达 3000 mm/hm², 灌水方式为大水漫灌, 无效蒸发、渗水较为严重, 在小麦生育期内大部分种植区域灌水在 3~5 次, 单次灌水量均在 1500 mm/hm² 以上^[1], 过量的灌水导致了水资源的大量浪费, 用水与供水矛盾日益凸显, 不利于水资源利用的可持续发展^[2]。为了追求高产, 种植户大量投入化肥, 尤其在生产和地力条件好的区域, 肥料施用量更大, 且以氮肥的施用量与占比最高。陈伟等^[3]调查研究表明, 甘肃定西地区农民种植小麦施氮量高达 210 kg/hm²。过量施用氮肥容易造成氮素的大量淋失, 并引发一系列的生态环境问题^[4]。在合理灌水基础上进行适量施肥有利于水肥的协同, 汤秋香等^[5]研究发现, 适量的水氮能促进根系生长, 提高水分利用效率。适量的施氮能促进作物生长, 同时增加干物质累积量, 进而提高小麦穗数与穗粒数^[6], 适量施氮有利于促进次生根生长与根系活力, 提高小麦灌浆所需氮的供给能力, 增加叶绿素和提高光合

产物在籽粒中的贮存^[7], 而过量施氮会抑制生殖生长与干物质的转移^[6], 影响氮素的吸收与转运以及作物的含氮量, 降低抗旱和抗倒伏能力, 以及氮素利用效率、植株氮素累积量、氮素干物质生产效率、氮素收获指数、氮肥农学利用效率及氮肥偏生产力等指标^[8]。同时, 施氮量与灌水量较少也不利于作物的生长。灌水量与施氮量会影响作物生长以及作物对土壤养分的吸收, 造成作物生理功能的不同, 使得氮素在作物各器官的吸收利用与分配转移存在差异, 进而影响籽粒氮素利用与产量提高。国内外已有大量关于水氮耦合的研究^[9], 且主要集中在水氮耦合对土壤硝态氮与铵态氮的影响, 大多关于不同水氮条件下小麦植株氮素变化与各器官氮素累积与转运、籽粒氮素吸收的报道不包含根部^[6,10], 缺少对小麦整体的探究。本试验在前人成果基础上, 研究不同水氮条件下小麦各生育期的干物质累积、氮含量及氮素转移, 探明不同水氮条件对小麦氮素的影响与机理, 为小麦合理灌水与施肥提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验在甘肃省定西市安定区凤翔镇安家坡村

作者简介: 梁伟琴, 主要从事农作物高效栽培研究, E-mail: 744250668@qq.com

贾莉为通信作者, 主要从事作物栽培技术推广工作, E-mail: 472354512@qq.com

基金项目: 兰州市科技局计划项目 (2020-ZD-142)

收稿日期: 2022-01-10; 修回日期: 2022-04-20; 网络出版日期: 2022-06-16

进行, 属中温偏旱带, 平均海拔 2000m, 日照时数 2476h, 昼夜温差大, 年均气温 6.4℃, 无霜期约 140d, 多年平均降雨量 385mm, 2019 年试验区小麦全生育期降雨量 304.2mm (图 1)。试验田土壤类型为黄绵土, 土层深厚且质地均匀。土壤容重 1.20g/cm³, pH 8.1, 含有机质 14.11g/kg、全氮 0.82g/kg、速效氮 127.28mg/kg、速效磷 12.16mg/kg、速效钾 185.44mg/kg。

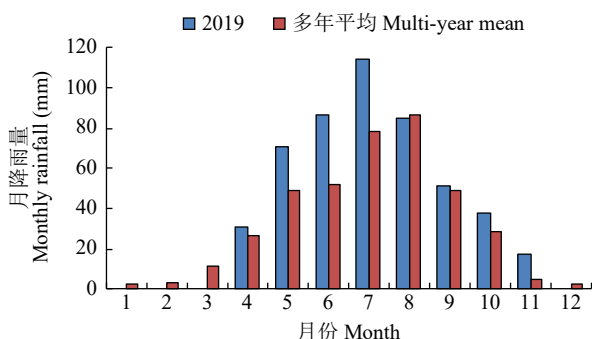


图 1 2019 年试验区降雨量与多年平均降雨量
Fig.1 Rainfall in the test area in 2019 and annual average rainfall

1.2 试验设计

供试小麦品种为陇春 27, 播种量均为 330kg/hm², 2019 年 3 月 28 日播种小麦, 7 月 26 日收获。试验采用水氮二因素裂区设计, 以灌溉量为主区, 设 3 个水平, 分别为 1000 (W1)、2000 (W2) 和 3000m³/hm² (W3); 施氮量为副区, 设 4 个水平, 分别为 0 (N0)、80 (N1)、160 (N2) 和 240kg/hm² (N3)。于春小麦 3 叶期、挑旗期及灌浆期各灌水 1 次, 小区隔离边行打埂并覆防渗透隔膜确保灌水不会侧漏流失, 并用水表控制灌水量, 同时利用水阀控制水流速度, 保证小麦植株不倒伏。3 叶期、挑旗期与灌浆期的灌水量分别占总水量的 30%、40%和 30%。小区面积 21.6m² (3.6m×6.0m)。播前底肥施入 40%氮肥和 P₂O₅ 180kg/hm², 3 叶期和挑旗期随灌水分别各施氮肥 30%。在小麦 3 叶期使用 2,4-D 丁酯喷雾防除田间杂草, 其他田间管理与当地生产相同。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 植株样品采集与产量 于小麦拔节期至成熟期分别采集地上部分植株与根部样品, 取样剔除边行, 选取小区中间长势整齐的小麦整株 (包括根) 20 株, 首先剪去根部称鲜重, 然后挖取剖面, 选取 30cm 整体根部, 清洗掉泥土称鲜重, 再然后杀青烘干后称干物质累积量。采集的植株样和根部样放

入烘箱, 在 105℃进行杀青, 30min 之后于 75℃烘干至恒重后称重。

收获时, 随机在每个小区选取 3 个 1m²样方作为测产点 (剔除小区边行, 距离边行 0.5m 以上) 进行采样, 当小麦脱粒后籽粒含水量约 13%时测产。

1.3.2 植株各器官氮含量 在成熟期, 选取小麦叶、茎、穗、籽粒, 分别测定各个部位的含氮量。烘干样品, 采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮与凯氏定氮法测定各时期小麦各器官 (叶、茎、穗轴+颖壳、籽粒及根) 的氮含量 (%) [11]。

1.3.3 计算方法 小麦花后干物质累积量 (kg/hm²) = 小麦成熟期地上部干物质累积量 - 小麦花期地上部干物质累积量 [12]。

小麦各器官氮素分配量 (kg/hm²) = 氮含量 (%) × 干物质质量;

各器官氮素分配比例 (%) = 各器官的氮素累积量/植株氮素累积量 × 100;

氮素收获指数 (nitrogen harvest index, NHI, %) = 籽粒氮素累积量/成熟期植株氮素总累积量 × 100;

氮素吸收效率 (nitrogen uptake efficiency, NUPE, kg/kg) = 植株氮素累积量/施氮量;

氮肥生产效率 (nitrogen fertilizer production efficiency, NPFP, kg/kg) = 籽粒产量/施氮量;

氮素干物质生产效率 (kg/kg) = 成熟期单位面积植株干重/植株氮素累积总量;

氮素籽粒生产效率 (kg/kg) = 成熟期籽粒产量/植株氮素累积总量;

氮肥利用率 (%) = (施氮区植株吸氮量 - 不施氮区植株吸氮量) / 施氮量 × 100 [13]。

1.4 数据处理

采用 Excel 进行数据统计整理, 用 SPSS 21.0 软件进行方差分析, 采用 SigmaPlot 12.0 制作三维柱状图。

2 结果与分析

2.1 不同灌水量与施氮量对春小麦干物质累积的影响

从拔节期到成熟期不同水氮条件下春小麦干物质累积量逐渐增大 (表 1), 相同处理条件下, 小麦开花期与灌浆期的干物质累积量较大, 与拔节期相比, 开花期干物质累积量增加 1819.86~3390.69kg/hm², 占成熟期小麦干物质质量的 25.55%~

44.89%；与开花期相比，灌浆期小麦干物质累积量增加 1260.45~4597.58kg/hm²，占成熟期干物质累积量的 37.75%~59.86%；与灌浆期相比，成熟期干物

质累积量增加 391.84~3092.30kg/hm²，占成熟期小麦干物质质量的 6.52%~25.33%，灌浆期为小麦干物质快速积累阶段，积累时间较开花期短，对应干物质

表 1 不同水氮条件对春小麦不同生育时期干物质累积量的影响

处理 Treatment		生育期 Growth period				花后干物质累积量
灌水 Irrigation	氮 Nitrogen	拔节期 Jointing	开花期 Anthesis	灌浆期 Filling	成熟期 Mature	Dry matter accumulation after anthesis
W1	N0	975.83bE	2795.66bD	4556.11bF	5005.40cH	2209.74bD
	N1	1118.02aCD	3816.20aBC	5618.30aDE	6010.14bFG	2193.94bD
	N2	1154.75aC	3921.62aBC	6082.31aDE	6899.20aEF	2977.58aCD
	N3	1198.33aC	4347.41acAB	6716.58aCD	7263.19aE	2915.78aCD
W2	N0	1018.22bDE	3421.13cCD	5206.52bEF	6018.10cG	2596.97cD
	N1	1179.91bC	4250.30bABC	7714.48bABC	8790.00bD	4539.70bC
	N2	1333.41aB	4570.81aAB	7910.38aABC	9812.48aC	5241.67aBC
	N3	1365.35aAB	4621.39aAB	8572.42aAB	10 405.10aBC	5783.71aB
W3	N0	1173.54bC	4010.22bABC	5669.47cDE	6890.50cE	2880.28bCD
	N1	1396.42aAB	4233.51abABC	7712.45bBC	10 770.32bBC	6536.81abAB
	N2	1551.58aAB	4942.27aA	7980.00abABC	11 072.30bAB	6130.03abAB
	N3	1474.13aA	4558.03abAB	9155.61aA	12 072.10aA	7514.07aA
F 值 F-value						
W		37.49**	6.81**	88.88**	87.66**	283.16**
N		30.05**	10.11**	77.13**	53.85**	34.50**
W×N		3.93**	0.49	6.30**	5.90**	8.83**

“*”：P<0.05；“**”：P<0.01，大写字母表示所有处理间差异性，不同小写字母表示在 0.05 水平同一灌溉下处理间差异性，下同
“*”：P<0.05；“**”：P<0.01，different capital letters meant significant difference among different irrigation and nitrogen treatments, and different small letters meant significant difference among different irrigation treatments at 0.05 level, the same below

累积量较开花期也少。

不同水氮条件下，除开花期外，无论单因素还是二因素互作对干物质累积量影响均达到极显著水平，因子水平表现为灌溉>氮肥>水氮互作。增加灌水量能够提高干物质累积量（W3>W2>W1）。不同的施氮条件下，在小麦拔节期至开花期、开花期至灌浆期，随着施氮量的增大春小麦干物质累积量增大（N3>N2>N1>N0），生长后期干物质累积量的增加值随施氮量的增大呈先增大后减小的趋势（N2>N3>N1>N0），N2处理增加最多。

W2和W3花后干物质累积量较W1分别增加了 76.38%和123.96%，N1、N2和N3较N0分别增加了 72.64%、86.67%和110.92%，与各生育期同一水氮条件下的干物质增加幅度相比较均有大幅增加，表明水氮亏缺不利于花后干物质的累积，相同施氮条件下增加灌水量可以提高花后干物质累积比例，而氮肥超过N2水平就不能有效增加干物质累积量。

2.2 不同灌水量与施氮量对小麦各生育期器官氮含量的影响

不同水氮处理下，小麦成熟期各器官氮含量不

同（图 2）。同一灌水处理下，小麦叶和茎的氮含量随着施氮量的增大均呈逐渐增大趋势（N3>N2>N1），颖壳+穗轴、籽粒与根的氮含量随施氮量的增加先增后减（N2>N3>N1）；同一施氮量处

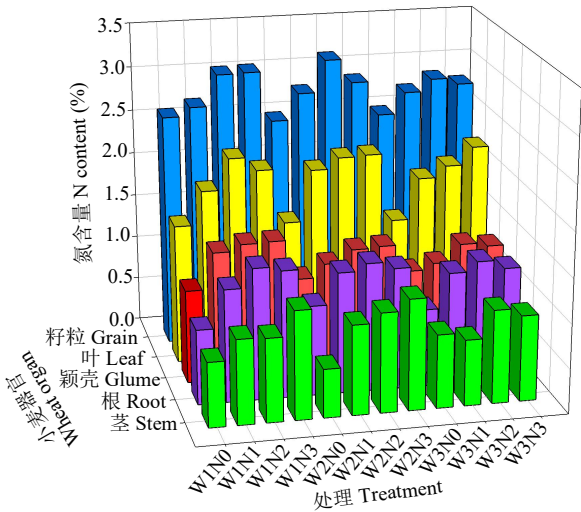


图 2 不同水氮条件对成熟期春小麦各器官的氮含量的影响

Fig.2 Effects of irrigation and nitrogen application rates on nitrogen contents in the different organs of spring wheat at mature stage

理下，小麦叶、茎、颖壳、籽粒与根的氮含量随着灌水量的增大呈先增大后减小趋势（W2>W3>W1）；同一灌水与施氮条件下小麦各器官氮含量依次为籽粒>叶>颖壳>根>茎。

2.3 不同灌水量与施氮量对小麦氮素累积与转运的影响

如表 2 所示，大部分处理下小麦的叶、茎、颖壳+穗轴、籽粒和根的氮累积量以及氮总和间存在极显著差异。同时，除根外，水氮对氮累积量的影响具有显著的交互效应，影响大小表现为氮肥>灌溉>水氮互作。小麦各器官氮累积量受氮含量与干物质累积量共同影响（氮含量×干物质质量），成熟期各器官氮累积量依次为籽粒>茎>颖壳+穗轴>叶>根。不同水氮配比处理下小麦籽粒、茎、颖壳+穗轴、叶及根的氮累积量占植株氮累积总量差异较大，以上器官的氮素分配比例分别为 64.91%~75.05%、10.17%~15.47%、6.92%~11.81%、3.01%~

6.12%及 1.16%~3.21%。灌水量和施氮量单因子或者水氮互作对春小麦籽粒、茎、颖壳+穗轴、叶及根占植株氮累积总量影响均达到显著水平。灌水量与施氮量对各营养器官的氮累积量影响显著。在相同灌水处理下，随着施氮的增加小麦的叶、茎及颖壳+穗轴的氮累积量逐渐增加（N3>N2>N1>N0），随着施氮的增加，籽粒和根的氮累积量表现为增加趋势（N2、N3>N1>N0）；在相同施氮量处理下，小麦的籽粒、茎、颖壳+穗轴、叶及根的氮累积量随着灌水量的增加呈先增加后减小的趋势（W2>W3>W1）；N1、N2、N3 较 N0 处理小麦植株全氮总累积量分别提高了 29.39%、53.10%和 58.07%，W2、W3 分别较 W1 处理氮累积量分别提高了 32.91%和 52.47%，W2N2 处理下，小麦籽粒的累积量显著高于其他大部分处理，较 W2N3、W3N2 和 W3N3 处理分别提高了 1.30%、5.76%和 1.99%。

表 2 不同水氮条件下春小麦各器官氮累积量
Table 2 Nitrogen accumulation in different organs of spring wheat under irrigation and nitrogen application rates kg/hm²

处理 Treatment		叶	茎	颖壳+穗轴	根	籽粒	氮总和
灌水 Irrigation	氮 Nitrogen	Leaf	Stem	Glume+rachis	Root	Grain	Total N
W1	N0	4.87cE	14.57cE	12.82dG	3.48cF	72.80cF	108.54cE
	N1	8.91bD	20.17bD	16.35cE	3.25bD	96.87bG	145.55bD
	N2	10.11aC	25.55bD	20.45bD	4.48aBC	124.65aE	185.24aC
	N3	11.27aB	30.51aBC	23.16aC	4.24aC	127.99aE	197.17aC
W2	N0	5.95cE	21.01dE	18.65dE	2.88cE	95.72dG	144.21cE
	N1	9.29bC	26.42cC	20.04cD	4.35bC	142.42cD	202.52bB
	N2	10.18bC	32.39bBC	25.19bB	4.76aA	181.73aA	254.25aA
	N3	14.32aA	37.76aA	28.77aA	4.75aA	179.40bB	265.00aA
W3	N0	6.65dE	17.12cDE	15.29dF	2.56cF	108.49cG	221.03cB
	N1	9.46cC	24.33bD	22.09cD	3.78bD	151.73bC	239.08bB
	N2	11.56bB	32.21aBC	27.61bAB	4.44aBC	171.83aB	255.25aA
	N3	15.29aA	30.62aB	25.65aB	4.12aC	178.19aA	255.12aA
F 值 F-value							
W		43.82**	30.64**	82.97**	29.66**	316.09**	289.34**
N		349.12**	227.99**	444.12**	217.64**	402.37**	573.03**
W×N		6.60**	9.95**	2.52*	0.70	20.56**	14.87**

2.4 不同灌水量与施氮量对小麦产量与氮素生产效率的影响

灌水量和施氮量能显著影响春小麦籽粒产量（表 3），籽粒产量在 2184.63~5472.52kg/hm²。相同施氮量条件下，小麦籽粒产量随着灌水量的增加呈增加趋势（W2、W3>W1），W3 和 W2 较 W1 籽粒平均增产 81.19%和 61.30%；相同灌水条件下，小麦籽粒产量随着施氮量的增加亦呈增大趋势，W3 处理下小麦籽粒产量最高，相同施氮量下，N2 和 N1 分别较 N0 处理平均增产 69.18%和 46.09%。

不同水氮处理均能影响春小麦氮素收获指数，收获指数介于 64.91%~75.32%，氮素收获指数随灌水量与施氮量的增大均成先增大后减小趋势。相同灌水时氮素收获指数随施氮量的增加先增加后减小（N1、N2>N3>N0）；相同施氮量时氮素收获指数随灌水量的增加呈先增加后减小的趋势（W2>W3>W1）。

氮素干物质生产效率与氮素籽粒生产效率对灌水与施氮的响应一致，相同施氮条件下，随灌水量的增大而增大；在相同灌水条件下，随施氮量的

表 3 灌水量与施氮量对春小麦产量与氮素生产效率的影响
Table 3 Effects of irrigation and nitrogen application rates on grain yield and nitrogen use efficiency

处理 Treatment		籽粒产量	NHI	氮素干物质生产效率	氮素籽粒生产效率	NUPE	NPFP	氮肥利用率
灌水 Irrigation	氮 Nitrogen	Grain yield (kg/hm ²)	(%)	N use efficiency of biomass (kg/kg)	N use efficiency of grain (kg/kg)	(kg/kg)	(kg/kg)	Recovery efficiency of N (%)
W1	N0	2184.63cE	66.45bD	46.98aA	20.51aB	—	—	—
	N1	2768.52bcDE	66.56abCD	41.29aB	19.02bC	1.81aB	34.61aC	46.26aB
	N2	3414.98abCD	67.29aBC	37.24bC	18.44cD	1.16bE	21.34bD	47.94aB
	N3	3656.33aC	64.91abCD	36.84bC	18.54cD	0.82cC	15.23cE	36.93bC
W2	N0	2975.32cDE	70.72bABC	41.73abB	20.63bC	—	—	—
	N1	4482.88bB	75.32aA	43.40aB	22.14aAB	2.53aA	56.03aB	72.89aA
	N2	5418.66aA	71.48aA	38.59bC	21.31bC	1.59bB	33.87bC	68.78aA
	N3	5446.90aA	67.70bCD	39.26bC	20.55bC	1.10cC	22.70cD	50.33bB
W3	N0	3396.25bCD	70.29bAB	52.96bA	26.10aA	—	—	—
	N1	5101.84aAB	71.80aA	50.96aA	24.14bB	2.64aA	63.77aA	22.56aD
	N2	5472.52aA	69.38cABC	44.71bB	22.10cC	1.55bB	34.20bC	21.39aD
	N3	5424.60aA	68.97dCD	47.55bA	21.37cC	1.06cC	22.60cD	14.20bE
F 值 F-value								
W		114.12**	31.06**	27.19**	34.52**	88.07**	35.91**	223.25**
N		76.22**	9.75**	64.36**	106.22**	933.23**	311.11**	183.38**
W×N		4.00**	3.25*	7.75**	2.88*	19.40**	8.23**	35.91**

增加先增后减（N1>N2>N3>N0），W2N1 与 W3N1 处理的氮素干物质生产效率与氮素籽粒生产效率较高。

氮素吸收效率、氮素生产效率与氮肥利用率均随灌水量的增加逐渐减小（W3、W2>W1），同一灌水条件下，氮素生产效率随施氮量的增加逐渐下降（N1>N2>N3）。

3 讨论

3.1 水氮耦合对小麦干物质累积量的影响

干旱是制约农业生产的主要因素，适量补充灌水在一定程度上能缓解作物生长中缺水的困境，延长功能叶片的持绿时间和增加作物叶面积指数，进而提高作物干物质的累积^[14]，而过量的农业灌溉造成水资源大量浪费。氮素是植物重要组成元素，适量补充氮肥能够促进作物生长显著增加干物质的累积量^[15]，提高作物产量^[10]，过量施氮会造成面源污染，影响生态环境。灌水与施氮对作物生长发育的作用之间存在着密切联系，以水促肥，以肥调水，彼此之间相互影响、相互制约。许多研究表明，优化水、氮供应量能提高小麦干物质积累总量和经济系数^[16]，是实现作物高产与水肥资源高效利用的有效途径^[3,9,17]。崔红艳等^[18]研究不同水氮对胡麻干物质积累和产量的影响时发现，水氮互作能够显著提高干物质累积量，且水分效应大于氮肥效应，施氮量相同时增加灌水量能明显增加其干物质分配量，

提高花后干物质同化量，这与本研究结论相似。相关水氮对作物生长的研究也表明，随灌水量的增加，干物质积累量显著提高^[17]，并提高生育后期干物质在籽粒中的的转运量，而增施氮肥能促进小麦根系生长^[3]，显著提高小麦叶绿素含量、改善叶面积系数与干物质积累量，提高干物质积累过程的平均速率和最大速率，当施氮量超过 225kg/hm²时产量则会下降^[19]。本研究表明，相同灌水量条件下，当施氮量超过 160kg/hm²时，再增加施氮量不能显著增加干物质累积量，相同施氮量水平下，当灌水量超过 2000m³/hm²时再提高则不能显著增加干物质累积量。相同结论也表明，过量的水氮使干物质累积量的增加幅度均减小，合理的水氮处理有利于干物质的累积与花后同化物向籽粒的转移^[18]。

3.2 水氮耦合对小麦氮含量、氮累积量与氮吸收转运的影响

增施化肥是农田氮素的重要来源，在作物生长过程中主要吸收利用的氮素来源于土壤自身的养分与外来肥料投入，氮肥利用率的高低与氮素损失之间存在密切关系，肥料中部分氮素会残留累积在土壤中或损失掉（硝化、反硝化、氨挥发、淋溶等）。氮素在植物体内的吸收利用受诸多外部环境（气候、土壤理化条件、农艺措施等）与内部环境（作物种类、品种等）的影响，研究表明水氮互作能促进作物对氮素的吸收、分配和转运^[17]，且施氮对小麦氮素转运量、氮转运效率及转运氮对籽粒氮的贡

献率均有显著影响^[20]，这与本研究结论相似。水氮耦合研究^[14]表明，作物对氮素的吸收因灌溉量的不同而异。秦姗姗等^[21]在研究水氮耦合对冬小麦氮素吸收时发现，灌水不能显著影响小麦氮含量的变化，增施氮肥可以增加小麦吸氮量与氮素积累量，当施氮量高于 $190\text{kg}/\text{hm}^2$ 时，小麦茎秆氮含量不再显著增加，超过 $230\text{kg}/\text{hm}^2$ 时，籽粒氮含量不再显著增加，水氮互作能促进氮素的吸收、提高氮素积累与协调氮素分配^[22]。本研究结果表明，同一灌水量条件下，随着施氮量的增大，小麦叶和茎部氮含量与氮累积量均呈逐渐增大趋势，氮累积量随着灌水量的增加而增大，灌水不足则影响籽粒中氮素吸收。其中，灌水量与施氮量对小麦植株的氮素吸收影响不一，适量增施氮肥能显著提高拔节至抽穗期氮素吸收比例^[23]，臧贺藏等^[24]研究认为，施氮对氮素积累的影响效应主要体现在花前，开花期灌水则对花后吸氮有一定的促进作用。本研究表明，随着施氮量的增加，花前氮累积量增加，花后适量灌水有利于花后氮转运与吸收，小麦穗、籽粒和根的氮含量与氮累积量随着施氮量的增大呈增大趋势，当施氮量高于 $160\text{kg}/\text{hm}^2$ 时氮含量降低，过量投入水和氮使植物贪青晚熟，不利于营养器官中的氮向籽粒转移。李世娟等^[25]研究发现，随灌溉量与施氮量的增加，氮素的吸收量显著增加，干旱胁迫不利于小麦植株对氮素的吸收。王小燕等^[26]等研究小麦的氮素转移时发现，增施氮肥能促进小麦植株对氮素的吸收，土壤氮（施入的氮与土壤固有的氮）的吸收和累积量随着灌溉水量的增加而增加，增加灌溉量能降低氮素向籽粒转移量和转移率，过量投入水氮不利于氮向籽粒转运与累积，这与本研究结果一致。

3.3 水氮耦合对小麦产量与氮素生产效率的影响

前人研究^[9]表明，水氮对作物生长及产量形成的调控存在互补效应，适量增施氮肥可提高光合速率与叶面积指数，增加作物产量弥补灌水不足带来的减产。吕丽华等^[27]认为，在有限灌溉条件下，水是限制氮肥肥效发挥的主要因素，通过调节水分供应能够更有效提高氮肥肥效而增加产量，当供水条件较好时，水分不是氮肥肥效发挥的限制因素，氮肥对产量的贡献增加，在供水条件差的年份，灌水为主效而氮肥的互补效应较小。本研究表明不同施氮量和灌水量对小麦生长均能起到调控、互促和协调作用，对植株氮素的吸收、转运、生产效率及吸

收效率等均会产生显著影响，其中灌水量对籽粒产量的影响起主导作用，施氮量对氮素的生产效率与吸收效率起主导作用，灌水与施氮之间有互作效应，适量灌水与施氮能够提高小麦产量，生产中应该做到“以水定肥、以肥调水、水肥协调”。

农业生产中氮素的吸收与利用由多因素决定，不同的水氮条件能影响作物对氮素的吸收与转运，氮素收获指数、干物质生产效率、籽粒生产效率与氮素在植物器官的累积转运具有直接或间接的关联^[28]。栗丽等^[29]研究发现，适宜的水氮（灌水量 $1500\text{m}^3/\text{hm}^2$ ，施氮量 $150\text{kg}/\text{hm}^2$ ）条件下，小麦籽粒产量、氮收获指数和氮肥利用率均达到最大。本研究表明，当灌水量 $2000\text{m}^3/\text{hm}^2$ 、施氮量 $80\text{kg}/\text{hm}^2$ 时氮素收获指数达到最大，而籽粒产量在灌水量 $2000\text{m}^3/\text{hm}^2$ 、施氮量 $160\text{kg}/\text{hm}^2$ 时较高。说明适宜的水氮条件有利于小麦籽粒与氮素收获指数的提高，而氮素生产效率随着施氮量的增大而减小。

4 结论

施氮和灌水对小麦各器官生长均能起到调控、互促、协调作用，能显著影响小麦干物质累积量、氮累积量和产量，并具有显著的交互效应。灌水量对干物质影响大于施氮量，小麦花后干物质累积量随着灌水量的增加而明显增加，过量施氮则不利于干物质的转移；小麦各器官氮含量为籽粒>叶>颖壳>根>茎，小麦茎、叶随着施氮量增加氮含量逐渐增大，随着施氮量的增加，小麦的叶、茎及颖壳、籽粒、根部的氮累积量表现为增加趋势，小麦各器官氮含量随着灌水量的增大呈先增后减的趋势，灌水不足则影响籽粒对氮的吸收；适宜的水氮（灌水量 $2000\text{m}^3/\text{hm}^2$ 和施氮量 $160\text{kg}/\text{hm}^2$ ）供给有利于籽粒生产效率、氮素生产效率与产量的提高。

参考文献

- [1] 刘斌. 河西地区率先建设节水型社会的探讨. 中国水利, 2004, 55(10): 45-47.
- [2] 寇雯萍, 张富仓, 冯磊磊, 等. 不同生育期灌水和施氮对河西地区春小麦生长和产量的影响. 干旱地区农业研究, 2010, 28(3): 1-6.
- [3] 陈伟, 孙建好, 赵建华. 甘肃省小麦施肥现状分析与评价. 干旱地区农业研究, 2013, 31(2): 23-27.
- [4] 巨晓棠, 谷保静. 我国农田氮肥施用现状问题及趋势. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4): 783-795.
- [5] 汤秋香, 林涛, 苏秀娟, 等. 极端干旱区滴灌量对冬小麦水氮利用及根系分布的影响. 麦类作物学报, 2015, 35(10): 1412-1418.
- [6] 蔡瑞国, 张迪, 张敏, 等. 雨养和灌溉条件下施氮量对小麦干物质积累和产量的影响. 麦类作物学报, 2014, 34(2): 194-202.

- [7] 孟维伟, 王东, 于振文. 施氮量对小麦氮代谢相关酶活性和子粒蛋白质品质的影响. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(1): 10-17.
- [8] 张凯, 陈年来, 顾群英. 不同水氮水平下小麦品种对光、水和氮利用效率的权衡. 应用生态学报, 2014, 27(7): 2273-2282.
- [9] 胡梦芸, 门福圆, 张颖君, 等. 水氮互作对作物生理特性和氮素利用影响的研究进展. 麦类作物学报, 2016, 36(3): 332-340.
- [10] 张雨新, 张富仓, 邹海洋, 等. 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. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(3): 597-605.
- [11] 石玉, 于振文. 施氮量及底追比例对小麦产量、土壤硝态氮累积量和氮平衡的影响. 生态学报, 2013, 26(11): 3661-3669.
- [12] 周玲, 王朝辉, 李富翠, 等. 不同产量水平旱地冬小麦品种干物质累积和转移的差异分析. 生态学报, 2012, 32(13): 4123-4131.
- [13] 张锡洲, 阳显斌, 李廷轩, 等. 小麦氮素利用效率的基因型差异. 应用生态学报, 2011, 22(2): 369-375.
- [14] 王海江, 崔静, 侯振安, 等. 膜下滴灌棉花水氮耦合对其干物质和水分利用效率的影响. 西北农业学报, 2010, 19(3): 76-80.
- [15] 李亚杰, 徐文修, 张娜, 等. 水氮耦合对滴灌复播大豆干物质积累氮素吸收及产量的影响. 干旱地区农业研究, 2016, 34(5): 79-84, 90.
- [16] 李志勇, 陈建军, 陈明灿. 不同水肥条件下冬小麦的干物质积累、产量及水氮利用效率. 麦类作物学报, 2005, 25(5): 80-83.
- [17] 郭丙玉, 高慧, 唐诚, 等. 水肥互作对滴灌玉米氮素吸收、水氮利用效率及产量的影响. 应用生态学报, 2015, 26(2): 3679-3686.
- [18] 崔红艳, 方子森. 水氮互作对胡麻干物质生产和产量的影响. 西北植物学报, 2016, 36(1): 156-164.
- [19] 马东辉, 王月福, 周华, 等. 氮肥和花后土壤含水量对小麦干物质积累、运转及产量的影响. 麦类作物学报, 2007, 27(5): 847-851.
- [20] 李东方, 李世清, 李紫燕, 等. 冬小麦同化物、氮素转移量和转移效率对氮肥的反应. 麦类作物学报, 2006, 26(5): 106-112.
- [21] 秦姗姗, 侯宗建, 吴忠东, 等. 水氮耦合对冬小麦氮素吸收及产量的影响. 排灌机械工程学报, 2017, 35(5): 440-447.
- [22] 赵建红, 李玥, 孙永健, 等. 灌溉方式和氮肥运筹对免耕轮沟栽培杂交稻氮素利用及产量的影响. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(3): 609-617.
- [23] 郭天才, 宋晓, 冯伟, 等. 高产麦田氮素利用、氮平衡及适宜施氮量. 作物学报, 2008, 34(5): 886-892.
- [24] 臧贺藏, 刘云鹏, 曹莲, 等. 水氮限量供给下两个高产小麦品种氮素吸收与利用特征. 麦类作物学报, 2012, 32(3): 503-509.
- [25] 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. 华北农学报, 2002, 17(1): 69-75.
- [26] 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. 中国农业科学, 2008, 41(10): 3015-3024.
- [27] 吕丽华, 董志强, 张经廷, 等. 水氮对冬小麦-夏玉米产量及氮利用效应研究. 中国农业科学, 2014, 47(19): 3839-3849.
- [28] Zakia I A., Shama E D., Ahmed A S. Effect of water stress and nitrogen application on grain yield of wheat: The 37th and 38th Meetings of the National Crop Husbandry Committee. Sudan: Agricultural Research and Technology Corporation Unit, 2006: 155-162.
- [29] 栗丽, 洪坚平, 王宏庭, 等. 水氮处理对冬小麦生长、产量和水氮利用效率的影响. 应用生态学报, 2013, 24(5): 1367-1373.

Effects of Irrigation and Nitrogen Application on Dry Matter Accumulation and Nitrogen Transport of Spring Wheat

Liang Weiqin¹, Jia Li², Guo Liming¹, Li Yinglan³, Hu Yafeng¹, Chen Xiaohua¹, Ma Xufeng¹, Li Jing¹

(¹Agricultural Technology Extension and Service Center of Anding District, Dingxi 743000, Gansu, China; ²Agricultural Technology and Popularization Center in Dingxi City, Dingxi 743000, Gansu, China; ³District Agricultural Radio and Television School of Dingxi Anding District, Dingxi 743000, Gansu, China)

Abstract In order to establish an optimum combination of water and nitrogen for spring wheat in central Gansu province, an experiment was conducted as a completely randomized split-plot design, with local wheat cultivar (Longchun 27) as the experimental material, taking irrigation [1000 (W1), 2000 (W2) and 3000m³/ha (W3)] as main plot treatment and N-supply as split-plot treatment [0 (N0), 80 (N1), 160 (N2) and 240kg/ha (N3)]. The effect of intermittent irrigation and nitrogen on dry matter accumulation, nitrogen content, nitrogen accumulation, and yield of spring wheat was investigated. The results showed dry matter accumulation, nitrogen accumulation, nitrogen transport and yield were significantly affected by irrigation treatment, N rate and irrigation treatment × N rate interaction. The increase in irrigation and nitrogen led to an initial increase in dry matter accumulation in wheat. N fertilizer had little impact, and water's contribution to dry matter accumulation more significant. The nitrogen contents of stems and leaves increased with the amount of nitrogen. The order of nitrogen content was grain > leaf > glume > root > stem, the order of irrigation and nitrogen rate effect on nitrogen content in vegetative organs was nitrogen > irrigation. Nitrogen content in vegetative organs increased first and then decreased with the increase of nitrogen rate and irrigation amount, the maximum grain yield were observed in W2N2 treatment. Suitable water and nitrogen condition was beneficial to the dry matter transfer from vegetative organs to reproductive organs, raise grain production efficiency, nitrogen production efficiency and yield of spring wheat. Thus, the irrigation schedule (2000m³/ha) and optimized nitrogen (160kg/ha) can promote the wheat growth.

Key words Wheat; Irrigation and nitrogen application; Dry matter accumulation; Nitrogen accumulation; Yield