

新型氮肥对潮土冬小麦产量及氮肥利用率的影响

岳克¹, 钟雯瑾², 宋晓¹, 张珂珂¹, 郭斗斗¹, 黄绍敏¹, 杨自超², 张水清^{1*}

(1. 河南省农业科学院植物营养与资源环境研究所, 河南 郑州 450002;

2. 河南心连心化学工业集团股份有限公司, 河南 新乡 453700)

摘要: 通过研究不同施氮量下, 新型氮肥与普通氮肥对潮土大田冬小麦产量、产量构成因素、地上部吸氮量、氮肥利用率和土壤全氮含量的影响, 用以探明华北潮土区小麦玉米轮作体系下科学合理施氮及适宜氮肥品种。从2016年6月开始在河南省现代农业研究开发基地—轻壤质潮土上设置了3种氮肥(控失尿素、腐植酸尿素和普通尿素)和6个施氮水平(0、100、150、200、250、300 kg·hm⁻²)的长期试验, 以不施氮为对照, 共16个处理。小麦收获期测产, 并统计产量构成因素。结果表明: 氮肥类型和施氮量及两者交互作用对小麦产量构成因素、地上部吸氮量和氮肥利用率都有显著影响。3种氮肥, 冬小麦产量均随着施氮量的增加而增加。各施氮处理与不施氮相比, 分别增产29.0%~66.2%、27.7%~79.7%、13.9%~59.4%。其中, 控失尿素的增产效果显著, 与腐植酸尿素和普通尿素相比, 在施氮量为300 kg·hm⁻²时, 达到最大产量7970 kg·hm⁻², 比普通尿素和腐植酸尿素分别提高了8.1%和12.7%。3种氮肥和施氮量对小麦产量构成因素也有显著或极显著影响。小麦每公顷穗数随着施氮量增加而增加, 并且控失尿素和腐植酸尿素小麦平均每公顷穗数分别比普通尿素提高了12.8%和17.3%。其中, 腐植酸尿素处理小麦穗粒数随着施氮量的增加而增加, 在施氮量为300 kg·hm⁻²时, 最大穗粒数达到34.6粒·穗⁻¹, 比普通尿素增加了23.1%。对于3种施氮肥处理, 小麦地上部吸氮量均随着施氮量的增加而增加, 与小麦产量表现一致的趋势。其中以控失尿素的小麦地上部平均吸氮量最大, 为161.3 kg·hm⁻²; 其次是腐植酸尿素, 为154.7 kg·hm⁻², 分别比普通尿素提高了9.6%和5.1%。与普通尿素相比, 控失尿素平均氮肥利用率提高了9.6个百分点, 施用控失尿素能够提高小麦氮肥利用率、偏生产力和农学效率。其中腐植酸尿素处理, 小麦氮肥利用率随施氮量的增加而增加。新型氮肥(控失尿素和腐植酸尿素)通过提高小麦产量构成因素、小麦产量、小麦氮素吸收量, 从而提高小麦氮肥利用率。本试验条件下, 从提高产量和氮肥利用率方面考虑, 控失尿素的增产效果优于腐植酸尿素, 在施氮量为300 kg·hm⁻²时, 达到最大产量。

关键词: 新型氮肥; 施氮量; 冬小麦; 产量; 吸氮量; 氮肥利用率; 土壤全氮

华北平原是我国粮食主产区之一, 主要粮食作物为冬小麦—夏玉米, 周年轮作。该地区小麦玉米单产分别为6341和5264 kg·hm⁻²^[1]。为了提高作物产量, 肥料投入量不断增加, 特别是施氮肥的现象普遍。据统计, 自20世纪80年代以来, 我国氮肥用量从943.3万t增加到2016年的3046.2万t, 增加了3倍多(复合肥折合1/3氮肥)^[1]。氮肥用量与作物产量呈显著正相关^[2]。因此, 在华北平原冬小麦—夏玉米轮作模式上, 氮肥施用过量的现象也较为普遍, 然而氮肥利用率显著下降^[3]。大量田间试

验表明, 施氮的增产效果和氮肥利用率并不高, 当季施氮不增产或者在低氮水平下就可以达到最大产量的结果比较普遍^[4-9]。长期过量施氮带来的一些环境问题也日益突出, 特别是氮淋失造成地下水污染和农田氮氧化物排放导致全球变暖等问题。所以, 研发高肥效、环保型氮肥是肥料行业的热点, 也是农业未来发展的方向。新型氮肥不仅能够满足作物养分需求, 减少氮挥发和氮淋失, 还可以增加作物产量, 提高肥料利用率。本研究中的控失尿素和腐植酸尿素是两种新型氮肥。已有研究表明, 一次性基施控失尿素能够提高作物产量和氮肥利用率^[10-11]。近年来, 市场上有各种各样的新型氮肥, 不同氮肥类型对作物产量和氮素吸收机理的影响等还需要进行试验研究。而如何施用新型氮肥, 在黄淮海地区小麦—玉米轮作制度上有显著的增产作用, 需要深入研究。

收稿日期: 2019-07-03; 录用日期: 2019-12-27

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFD0301103); 河南省农业科学院优秀青年基金项目(2020YQ13)。

作者简介: 岳克(1991-), 男, 河南省南阳市人, 硕士研究生, 从事土壤学研究。E-mail: 779048388@qq.com。

通讯作者: 张水清, E-mail: zsq510@163.com。

因此,研究新型氮肥在不同施氮量下,对作物的产量和氮素吸收的影响,为探明新型氮肥科学施用提供理论依据。控失尿素和腐植酸尿素都是新型肥料,控释肥料是指能够减缓或控制养分释放的新型肥料,而控失肥料是指通过在肥料内添加包裹型材料以控制养分损失的一种新型肥料,从广义上看,也是控释肥料的一种。腐植酸尿素是指将腐植酸、尿素和水按一定配比制成的一种新型肥料。新型氮肥相比普通氮肥,肥效长,能够为作物整个生育期提供养分,降低肥料气态损失或淋溶损失,降低环境污染,提高肥料利用率,减少施肥次数等^[12-14]。有研究表明,连续两周年冬小麦/夏玉米一次性基施控失尿素能够控量节本、增产增效和提高氮肥利用率^[10]。大量田间试验表明,施用缓/控释氮肥能够增加作物产量,提高作物氮素积累和氮肥利用率^[15-16]。谭德水等^[17]在黄淮海东部冬小麦一次性施肥的产量效应的研究中发现控释尿素随小麦播种一次性施用,比习惯施肥和普通肥料优化施用,在稳产、提高氮吸收、节本增效等方面优势明显。近年来,许多研究表明,缓/控释肥料对提高作物产量、提高氮肥利用率和降低氮肥损失都有明显效果^[18-20]。刘红恩等^[21]研究表明,施用腐植酸尿素能够增加作物产量,提高氮肥利用率。袁天佑等^[22]在腐植酸与尿素配施对冬小麦产量和氮肥利用率的影响研究中发现,常规施肥减氮 15%+ 腐植酸能够提高小麦产量和氮肥利用率。

近年来,学者们在不同类型的土壤上小麦对普通氮素吸收利用研究较多,如 Si 等^[23]、巨晓棠等^[5]。还有学者们主要研究缓/控释氮肥在玉米或水稻上的田间应用,如王宜伦等^[24]、姬景红等^[25]、杨超越等^[26]。这些试验多是研究氮肥运筹对作物的影响,而围绕控失氮肥和施氮量对生育期较长的冬小麦的氮素吸收利用研究较少。对腐植酸的研究多是作为添加剂,而围绕腐植酸尿素和施用量对小麦的氮素吸收利用研究较少。本研究通过两种新型氮肥(控失尿素和腐植酸尿素)与普通尿素作比较,研究不同氮肥类型和施氮量对小麦产量、产量构成因素、地上部吸氮量、氮肥利用率和土壤全氮的影响,为新型氮肥的推广应用以及科学合理施肥提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区域与供试土壤

试验于河南省现代农业研究开发基地-国家潮

土土壤肥力与肥料效应长期监测站(N35° 00' 28.43", E113° 1' 47.66")内进行,位于新乡市平原新区,该地区属于半干旱半湿润暖温带季风气候,年有效积温 4 700℃,年平均温度为 15.6℃,年均降水量为 645 mm,主要集中在 6~8 月份,无霜期 209 d。供试土壤类型为轻壤质潮土,在 2016 年 6 月 20 日,播种玉米前采集试验地不同土层基础土样,分析保存,土壤基本性质见表 1。

表 1 供试土壤基础化学性质

土层 (cm)	全氮 (g·kg ⁻¹)	有效磷 (mg·kg ⁻¹)	速效钾 (mg·kg ⁻¹)	有机质 (g·kg ⁻¹)
0~20	0.74	26.5	147	11.8
20~40	0.52	12.3	78	7.8

1.2 试验设计

试验种植模式为冬小麦-夏玉米轮作,采用两因素设计-氮肥类型(普通尿素、控失尿素、腐植酸尿素)和施氮量,设 6 个施氮水平分别为 0、100、150、200、250、300 kg·hm⁻²,共 16 个处理。小区面积 6 m×8 m,试验区周围设 2 m 保护带,各处理随机排列,4 次重复。

氮肥选用普通尿素(氮 46.4%),控失尿素(氮 43.2%)和腐植酸尿素(氮 44%)。3 种氮肥施氮量一样,播种前均作基肥一次施入。各处理磷肥(P₂O₅)用量为 75 kg·hm⁻²,钾肥(K₂O)用量为 60 kg·hm⁻²。磷肥为过磷酸钙,钾肥为氯化钾,也作为基肥一次施入。

2016 年 10 月 17 日,试验区旋耕 2 遍,小麦季施肥量与上季玉米相同,小麦品种选用郑麦 7698,播种量 180 kg·hm⁻²,2017 年 6 月 1 日收获。

1.3 样品采集和测定

土壤取样:试验前随机选取 5 个点,采集 0~20 和 20~40 cm 的土壤样品,测定土壤基础理化性质,在小麦玉米收获后,分别在各处理中取 0~15 cm 土样,每个小区取两点混合,风干、磨碎、过筛。用浓 H₂SO₄ 消煮,蒸馏-凯氏法测定。

植株取样:在成熟期取样,样品分茎叶和穗(小麦穗分为籽粒和颖壳)两部分,杀青烘干称重,粉碎,植株样品全氮测定用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮,蒸馏-凯氏法测定。

产量测定:在成熟期随机取 1 m 单行小麦,籽粒与地上部分开杀青烘干称重,并对小麦进行考种;另外,随机连续收割 3 行小麦,脱粒烘干,进

行测产。

1.4 数据处理

地上部吸氮量 (kg · hm⁻²) = 地上部生物量 (kg · hm⁻²) × 植株地上部氮浓度 (g · kg⁻¹) / 1 000

氮肥利用率 (%) = [施氮处理植株吸氮量 (kg · hm⁻²) - 不施氮处理植株吸氮量 (kg · hm⁻²)] / 施氮量 (kg · hm⁻²) × 100

农学效率 (kg · kg⁻¹) = [施氮处理籽粒产量 (kg · hm⁻²) - 不施氮处理籽粒产量 (kg · hm⁻²)] / 施氮量 (kg · hm⁻²)

氮肥偏生产力 (kg · kg⁻¹) = 施氮区产量 (kg · hm⁻²) / 施氮量 (kg · hm⁻²)

采用 Excel 2003 对数据进行处理, 采用 SPSS 11.0 软件对数据进行方差分析和多重比较。

2 结果与分析

2.1 新型氮肥及施氮量对小麦产量的影响

由表 2 可以看出, 不同施氮量对小麦产量有显著影响, 但是氮肥类型和两者交互作用对小麦产量影响不显著。3 种氮肥, 小麦产量均随着施氮量的增加而增加。在施氮量为 300 kg · hm⁻² 时, 产量达到最大, 并且显著高于其他处理。可能是在秸秆还田的条件下, 为了维持土壤碳氮比平衡, 微生物活动需要大量氮源, 所以在高施氮条件下能够获得较高产量。

表 2 新型氮肥及施氮量对小麦产量的影响

(kg · hm ⁻²)			
施氮量	普通尿素 产量	控失尿素 产量	腐植酸 尿素产量
N0	4 435 ± 539d	4 435 ± 539c	4 435 ± 539c
N100	5 720 ± 282c	5 662 ± 409bc	5 052 ± 636c
N150	5 320 ± 185c	6 279 ± 879b	5 575 ± 1 039bc
N200	6 419 ± 286b	6 670 ± 846b	6 403 ± 855ab
N250	6 230 ± 200b	5 882 ± 710b	6 869 ± 843ab
N300	7 371 ± 230a	7 970 ± 1 286a	7 070 ± 1 030a
显著水平 (P)			
氮肥类型	0.397 ^{NS}		
施氮量	0.000 ^{**}		
类型 × 施氮量	0.309 ^{NS}		

注: 同一列数字不同小写字母表示差异达 5% 显著水平 (P<0.05)。NS 表示在 0.05 水平下差异不显著; *、** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平下差异显著, 下同。

从普通尿素来看, 随着施氮量的增加, 小麦产量呈增加趋势; 与不施氮处理相比, 施氮处理小麦产量分别增加了 29.0%、19.9%、44.7%、40.5%、66.2%, 施氮处理均显著高于不施氮处理。从控失尿素来看, 随着施氮量的增加, 小麦产量呈增加趋势; 与不施氮处理相比, 施氮处理小麦产量分别增加了 27.7%、41.6%、50.4%、32.6%、79.7%, 施氮量在 100 kg · hm⁻² 以上时, 小麦产量增产显著, 并且在施氮量为 300 kg · hm⁻² 时, 产量达到最大。从腐植酸尿素来看, 小麦产量随着施氮量的增加而增加, 与不施氮处理相比, 施氮处理小麦产量分别增加了 13.9%、25.7%、44.4%、54.9%、59.4%, 施氮量在 200、250 和 300 kg · hm⁻² 时, 小麦增产显著, 但 3 个处理差异不显著。在相同施氮水平下, 除了施氮量为 100 和 250 kg · hm⁻² 的处理, 控失尿素各处理的产量均高于其他两种氮肥。以上结果表明, 3 种氮肥, 小麦产量均随着施氮量的增加而增加。

通过计算可以看出, 普通尿素、控失尿素和腐植酸尿素处理, 小麦平均产量分别为 5 916、6 150、5 901 kg · hm⁻²。以控失尿素处理增产效果最优。与普通尿素处理和腐植酸尿素处理相比, 小麦平均产量分别增加了 3.9% 和 4.2%。从最高产量来看, 所有处理中控失尿素施氮量为 300 kg · hm⁻² 时, 产量最高, 分别比普通尿素和腐植酸尿素增产 8.1% 和 12.7%。也说明了控失尿素处理的增产效果优于其他两种氮肥。

2.2 新型氮肥及施氮量对小麦产量构成因素的影响

从表 3 可以看出, 氮肥类型对小麦每公顷穗数和穗粒数影响极显著; 施氮量对小麦每公顷穗数和穗粒数也具有极显著影响, 对小麦千粒重有显著影响; 两者交互作用对小麦每公顷穗数有极显著影响。3 种氮肥, 小麦每公顷穗数基本随着施氮量的增加而增加, 说明了小麦产量的增加主要原因是每公顷穗数的增加。

从平均每公顷穗数来看, 3 种氮肥平均每公顷穗粒数分别为 407 × 10⁴、459 × 10⁴ 和 478 × 10⁴ hm², 控失尿素和腐植酸尿素分别比普通尿素提高了 12.8% 和 17.3%。从小麦平均穗粒数来看, 3 种氮肥的平均穗粒数分别为 24、27 和 28。整体表现为控失尿素和腐植酸尿素对小麦产量构成因素的效果优于普通尿素。除了腐植酸尿素外, 其他两种氮

表 3 新型氮肥及施氮量对小麦产量构成因素的影响

氮肥类型	施氮量	每公顷穗数 ($\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$)	穗粒数 (个)	千粒重 (g)
普通尿素	N0	373.0 b	22.4 a	50.6 a
	N100	429.0 ab	21.6 a	51.3 a
	N150	389.8 b	20.3 a	51.0 a
	N200	353.8 b	24.3 a	51.2 a
	N250	398.9 b	27.8 a	50.0 a
	N300	498.6 a	28.1 a	49.6 a
控失尿素	N0	373.0 c	22.4 a	50.6 a
	N100	412.6 bc	25.9 a	52.5 a
	N150	467.2 ab	27.7 a	52.4 a
	N200	545.1 a	32.1 a	48.3 a
	N250	480.9 ab	26.2 a	50.7 a
	N300	477.2 ab	28.2 a	50.2 a
腐植酸尿素	N0	373.0 b	22.4 c	50.6 ab
	N100	416.7 b	25.9 bc	51.4 a
	N150	408.5 b	25.7 bc	52.2 a
	N200	515.0 a	26.5 bc	50.1 ab
	N250	555.6 a	30.9 ab	51.1 a
	N300	597.0 a	34.6 a	48.9 b
显著水平 (<i>P</i>)				
氮肥类型		0.000**	0.006**	0.936 ^{NS}
施氮量		0.000**	0.000**	0.011*
类型 $\times$ 施氮量		0.000**	0.094 ^{NS}	0.488 ^{NS}

肥处理对穗粒数和千粒重无明显影响。对于腐植酸尿素来说,随着施氮量的增加,小麦穗粒数呈增加趋势,施氮量在 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,小麦穗粒数最大。但从小麦千粒重来看,随着施氮量的增加,小麦千粒重呈先增加后减少的趋势,在施氮量为 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,小麦千粒重最小。这也说明了,与其他两种氮肥处理相比,腐植酸尿素在施氮量为 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,虽然每公顷穗数和穗粒数都比较大,但是产量不是最大,原因可能是千粒重较小。氮肥类型和施氮量对小麦每公顷穗数的影响达显著水平。在相同施氮水平下,除了施氮量为 100 和 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,新型氮肥的各处理小麦每公顷穗数均高于普通尿素。在施氮量为 $250 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,控失尿素的小麦每公顷穗数低于腐植酸尿素,这与产量表现一致。综上,3 种氮肥,腐植酸尿素对小麦产量构成因素影响最大,原因可能是腐植酸能够提高作物根系活力,改善氮素在土壤中的分布,进而提高

作物对氮素的吸收利用。也说明了腐植酸尿素对小麦生理性状的影响更大。

2.3 新型氮肥及施氮量对小麦各部分吸氮量和氮素分配的影响

从表 4 可以看出,3 种氮肥,小麦籽粒吸氮量、秸秆吸氮量和地上部吸氮量均随着施氮量的增加而增加。氮肥类型对小麦各部分氮含量有极显著影响,对籽粒吸氮量有显著影响;施氮量对小麦各部分氮含量和各部分吸氮量都有极显著影响;两者交互作用对小麦各部分氮含量和秸秆吸氮量有极显著影响,对地上部吸氮量有显著影响。从小麦各器官氮含量来看,小麦各器官氮含量随施氮量的增加呈增加趋势。从小麦各部分吸氮量来看,随着施氮量的增加,小麦各部分吸氮量均呈现增加趋势。3 种氮肥,在相同施氮水平下,除了施氮量为 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,新型氮肥的各处理小麦籽粒和秸秆氮含量均高于普通尿素,提高了小麦地上部吸氮量,进

而提高小麦氮肥利用率；3 种氮肥，在相同施氮水平下，新型氮肥的各处理籽粒吸氮量均高于普通尿素，而新型氮肥对秸秆吸氮量和地上部吸氮量的影响没有明显的规律，与普通尿素相比，表明了新型氮肥能够促进小麦秸秆氮素向籽粒氮转运，进而提高小麦产量。

表 4 新型氮肥及施氮量对小麦各部分吸氮量的影响

氮肥类型	施氮量	籽粒氮含量 (%)	秸秆氮含量 (%)	籽粒吸氮量 (kg·hm ⁻²)	秸秆吸氮量 (kg·hm ⁻²)	地上部吸氮量 (kg·hm ⁻²)
普通尿素	N0	1.74 c	0.43 b	79.46 d	21.96 c	107.20 d
	N100	1.65 c	0.35 c	94.44 cd	26.44 c	128.18 cd
	N150	1.83 bc	0.38 bc	97.55 cd	25.68 c	129.35 c
	N200	1.67 c	0.35 c	107.15 bc	26.60 c	139.99 bc
	N250	1.95 ab	0.45 b	120.15 b	32.47 b	160.98 b
	N300	2.07 a	0.54 a	152.68 a	53.04 a	217.47 a
控失尿素	N0	1.74 d	0.43 a	79.46 c	21.96 c	107.20 d
	N100	1.77 cd	0.41 a	97.39 bc	25.42 bc	126.77 cd
	N150	1.92 bc	0.47 a	121.08 b	35.10 bc	165.02 b
	N200	2.25 a	0.49 a	150.31 a	35.68 ab	194.98 ab
	N250	1.97 b	0.49 a	122.48 b	28.16 ab	159.15 bc
	N300	2.03 b	0.54 a	161.97 a	43.19 a	214.42 a
腐植酸尿素	N0	1.74 c	0.43 cd	79.46 b	21.96 c	107.20 c
	N100	1.85 c	0.39 de	95.50 b	17.96 c	122.66 c
	N150	1.72 c	0.36 e	94.57 b	21.59 c	123.39 c
	N200	2.10 ab	0.46 bc	129.04 a	32.55 b	170.55 b
	N250	2.04 b	0.51 b	145.41 a	36.51 b	192.07 ab
	N300	2.23 a	0.62 a	158.22 a	45.77 a	212.36 a
显著水平 (P)						
氮肥类型		0.000**	0.000**	0.025*	0.438 ^{NS}	0.089 ^{NS}
施氮量		0.000**	0.000**	0.000**	0.000**	0.000**
类型 × 施氮量		0.000**	0.005**	0.098 ^{NS}	0.008**	0.027*

对于普通尿素来说，小麦各部分平均吸氮量分别为 108.6、31.1、147.2 kg·hm⁻²。在施氮量为 300 kg·hm⁻² 时，小麦各部分吸氮量达到最大，显著高于其他处理。对于控失尿素来说，小麦各部分平均吸氮量分别为 122.1、31.9、161.3 kg·hm⁻²，也表现出类似规律；从小麦各部分吸氮量来看，除了施氮量为 300 kg·hm⁻² 外，各施氮处理差异不显著。对于腐植酸尿素来说，小麦各部分平均吸氮量分别为 117.0、29.9、154.7 kg·hm⁻²。在施氮量为 0 ~ 150 kg·hm⁻² 时，各处理的小麦各部分吸氮量均差异不显著。在施氮量为 200 ~ 300 kg·hm⁻² 时，小麦各部分吸氮量显著高于施氮量为 0 ~ 150 kg·hm⁻² 时各处理，除了籽粒吸氮量外，小麦各部分吸氮量在 300 kg·hm⁻² 时达到最大，并显著高于

其他两个处理。通过计算不同氮肥处理小麦各部分平均吸氮量，整体表现为控失尿素 > 腐植酸尿素 > 普通尿素。

2.4 新型氮肥及施氮量对氮素利用效率的影响

氮肥偏生产力和农学效率都是描述氮肥利用率的重要指标。从表 5 可以看出，施氮量对小麦氮肥利用率和氮肥偏生产力有极显著影响；氮肥类型对小麦氮肥利用率有显著影响；两者交互作用对氮肥利用率有显著影响。3 种氮肥，在相同施氮水平下，除了施氮量为 250 和 300 kg·hm⁻²，控失尿素各处理的小麦氮肥利用率显著高于其他两种氮肥。在高量施氮水平下，各处理的氮肥利用率无明显差异。氮肥类型和两者交互作用对氮肥偏生产力和农学效率没有显著影响。

表 5 新型氮肥及施氮量对氮素利用效率的影响

氮肥类型	施氮量	氮肥利用率 (%)	氮肥偏生产力 ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	农学效率 ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
普通尿素	N100	21.0 b	57.20 a	12.85
	N150	14.8 b	35.46 b	5.90
	N200	16.4 b	32.09 c	9.92
	N250	21.5 b	24.92 d	7.18
	N300	36.8 a	24.57 d	9.79
控失尿素	N100	19.6 a	56.62 a	12.27
	N150	38.5 a	41.86 b	12.29
	N200	43.9 a	33.35 c	11.18
	N250	20.8 a	23.53 d	7.20
	N300	35.7 a	26.57 d	11.78
腐植酸尿素	N100	15.5 a	50.52 a	6.17
	N150	19.8 a	37.16 b	7.60
	N200	31.7 a	32.02 bc	9.84
	N250	33.9 a	27.48 cd	9.74
	N300	35.1 a	23.57 d	8.78
显著水平 (P)				
氮肥类型		0.030*	0.204 ^{NS}	0.122 ^{NS}
施氮量		0.006**	0.000**	0.443 ^{NS}
类型 $\times$ 施氮量		0.029*	0.158 ^{NS}	0.227 ^{NS}

对于普通尿素来说,随着施氮量的增加,小麦氮肥利用率有增加趋势,施氮量为 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,氮肥利用率显著高于其他处理;氮肥偏生产力随着施氮量的增加而减小;农学效率随着施氮量增加有减小趋势。对于控失尿素来说,小麦氮肥利用率随着施氮量的增加有先增加后减小趋势,但差异不显著;氮肥偏生产力随着施氮量的增加而减小;农学效率随着施氮量增加有先减小后增加的趋势。与普通尿素相比,控失尿素处理明显提高了氮肥偏生产力和农学效率。对于腐植酸尿素来说,随着施氮量增加,小麦氮肥利用率呈增加趋势;氮肥偏生产力与其他氮肥处理表现的规律一样;农学效率随施氮量增加有先增加后减小的趋势。

通过计算可知,控失尿素的平均氮肥利用率为 31.7%,比腐植酸尿素和普通尿素分别提高了 6.1、9.6 个百分点。整体表现趋势为控失尿素 > 腐植酸尿素 > 普通尿素。以上结果表明,3 种氮肥均表现出增施氮肥能够提高小麦氮素利用率,普通尿素和腐植酸尿素效果显著;3 种氮肥,氮肥偏生产力均表现出随施氮量的增加而减小,差异显著。

2.5 新型氮肥及施氮量对土壤全氮的影响

由表 6 可以看出,对小麦收获后土壤全氮含量进行显著差异性分析,结果表明:氮肥类型和施氮量及两者交互作用对 $0 \sim 15 \text{ cm}$ 土壤全氮无明显影响。原因可能是在本试验条件下,试验周期仅进行一季,时间短,并且氮肥易随水流失,小麦季生育期较长,本试验设计一次性施肥,不同氮肥和施氮量对土壤全氮无显著影响,这与前季玉米收获后土壤全氮结果相同。但不同氮肥类型,土壤全氮含量均值有所差异。不施氮肥处理土壤全氮含量均值为 $0.83 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;普通尿素所有处理土壤全氮含量均值为 $0.81 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;控失尿素所有处理土壤全氮含量均值为 $0.82 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;腐植酸尿素所有处理土壤全氮含量均值为 $0.82 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。与不施氮相比,3 种氮肥处理土壤全氮含量均值分别低于不施氮处理,但差异不显著。可能是试验周期短,本试验在砂性比较高的潮土上进行,保水保肥性差,氮肥易随水流失,所以各处理对土壤全氮含量影响差异不显著。以上结果表明,3 种氮肥,控失尿素和腐植酸尿素土壤全氮含量均值高于普通尿素,说明了新型氮肥能够

影响土壤表层全氮含量，而对土壤深层氮含量的影响需进一步研究。

表 6 新型氮肥及施氮量对土壤全氮的影响

氮肥类型	施氮量	氮含量 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
普通尿素	N0	0.83
	N100	0.76
	N200	0.83
	N300	0.83
控失尿素	N0	0.83
	N100	0.82
	N200	0.82
	N300	0.81
腐植酸尿素	N0	0.83
	N100	0.77
	N200	0.83
	N300	0.86
显著水平 (P)		
氮肥类型		0.770 ^{NS}
施氮量		0.055 ^{NS}
类型 $\times$ 施氮量		0.396 ^{NS}

3 讨论

本文通过新型氮肥（控失尿素和腐植酸尿素）与普通氮肥对比，研究氮肥类型和施氮量对小麦氮素吸收利用、产量和产量构成因素的影响。结果表明，3 种氮肥均能提高小麦产量、每公顷穗数、地上部吸氮量和氮肥利用率，以控失尿素处理效果最好，其次是腐植酸尿素。

3 种氮肥和施氮量对小麦产量都有明显影响。一般来说，作物产量随施氮量的增加而呈增加趋势，但在超过一定施氮量下产量不增加或增加缓慢^[27]。巨晓棠等^[5]研究表明，在华北地区冬小麦-夏玉米轮作模式下，3 季作物（玉米-小麦-玉米）习惯施氮量达到 $900 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，与优化施氮量（ $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ）相比，增加了 3 倍用量，但作物产量没有明显提高。过量施氮和不合理施氮都会造成氮肥利用率低和一系列环境问题^[28-30]。李久生等^[31]研究表明，冬小麦氮素吸收量随施氮量的增加而增加，但施氮量对其产量没有显著影响。本试验研究结果表明，3 种氮肥，小麦产量随着施氮量的增加而增加。但是腐植酸尿素处理，在施氮量超过 $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时产量增加不显著。而控失尿

素和普通尿素在施氮量 $250 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 下产量低于施氮量 $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，但差异不显著。有研究表明，控释尿素添加 20% 比例以上，与常规尿素处理相比，能显著提高小麦产量^[32]。也有研究表明，减氮 20% 的基施缓/控尿素不仅可以保证产量，提高氮肥利用率，还降低劳动成本，增加经济效益^[33]。本试验结果表明，与普通尿素和腐植酸尿素相比，施用控失尿素的小麦平均产量高于其他两种氮肥处理；并在施氮量为 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时小麦产量稍高于普通尿素施氮量 $250 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。在施氮量为 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时，达到最大产量，比普通尿素和腐植酸尿素分别提高了 8.1% 和 12.7%。也有研究表明，腐植酸尿素能够促进植物生长，并提高产量^[34]。腐植酸对植株的影响主要是增加根系生物量，促进根系的活力，进而影响植株对养分的吸收^[35-36]。本试验研究结果可以看出，在大量施氮水平下，新型氮肥的各处理小麦产量高于普通尿素，而在低量施氮水平下，各处理差异不显著。在施氮量为 $250 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时，腐植酸尿素处理的小麦产量高于其他两种氮肥处理。并且腐植酸尿素对小麦产量构成因素影响显著。综上表明，在本试验条件下，从 3 种氮肥处理的小麦平均产量来看，控失尿素的增产效果要优于其他两种氮肥，但无显著差异。

本试验 3 种氮肥均对小麦每公顷穗数有显著影响，也都表现为随施氮量的增加而增加；腐植酸尿素对小麦千粒重和穗粒数也有显著影响。Sieling 等^[37]研究认为，增施氮肥能够增加单位面积上的小麦穗数。腐植酸尿素小麦产量的增加主要原因是单位面积上小麦穗数随施氮量的增加而增加，从而提高产量，与前人研究结果一致。有研究表明，不同活化处理的腐植酸尿素能够显著提高冬小麦产量^[38]。张树清等^[39]研究表明，腐植酸的吸附量随氮含量的增加而增加。已有研究表明，腐植酸与氮肥配施，不仅可以促进作物生长，还可以促进作物对氮的吸收，提高肥效^[40-41]。本试验结果可以看出，对于腐植酸尿素来说，随着施氮量的增加，小麦穗粒数呈增加趋势；而在施氮量为 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时，小麦千粒重显著低于对照处理，可能是因为小麦较大的群体并不利于成熟期籽粒的氮素累积。所以在施氮量为 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时，虽然有较高的穗数和穗粒数，但产量并不是最高。

本试验结果表明，3 种氮肥小麦地上部吸氮量均表现出随施氮量的增加而增加。从地上部吸氮量

来看, 3 种氮肥, 均在施氮量为 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 地上部吸氮量达到最高, 与小麦产量表现一致趋势。控失尿素小麦地上部平均吸氮量比普通尿素和腐植酸尿素分别高 8.1% 和 0.3%。腐植酸尿素小麦地上部平均吸氮量也表现出较高吸氮量, 比普通尿素高 7.8%。施用腐植酸尿素能够促进小麦对氮的吸收, 提高肥力^[23-24]。因此, 控失尿素和腐植酸尿素均对提高小麦地上部氮素累积效果较好, 腐植酸尿素效果更平稳。

于淑芳等^[42]研究表明, 与普通尿素相比, 施用控失尿素能够显著提高氮肥偏生产力和农学效率。周丽平等^[18]认为, 控失尿素一次性基施的氮肥利用率高于普通尿素一次性基施。张宏等^[43]研究表明, 在冬小麦-夏玉米种植模式上, 小麦的氮肥利用率和氮肥农学效率随施氮量的增加分别呈降低趋势。本试验研究结果可以看出, 控失尿素处理的平均氮肥利用率比腐植酸尿素和普通尿素分别提高了 6.1、9.6 个百分点。对于普通尿素来说, 氮肥利用率随施氮量的增加呈现先降低后增加的趋势。而控失尿素处理均表现出较高的氮肥利用率, 在施氮量为 $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 达到最大氮肥利用率 (43.9%)。腐植酸尿素在施氮量为 $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 及以上时, 小麦氮肥利用率显著高于低氮水平。这与前人^[44]的研究结果一致。

本试验小麦收获后, 氮肥类型与施氮量及两者交互作用对土壤全氮没有明显影响, 这与玉米季收获后土壤全氮含量表现一致^[45]。刘艳丽等^[44]研究表明, 施肥处理对土壤全氮含量和有机碳含量没有显著影响。本试验也表现出类似的结果, 可能的原因是试验进行一年, 施肥时间短, 土壤氮累积量较低; 也可能是供试土壤为轻壤质潮土, 属于中低产田, 土壤砂性比较高, 漏水漏肥问题比较严重, 而且氮素易随水流失, 灌水和降水均对土壤氮素影响较大, 氮素淋失是氮素损失的主要原因, 特别是耕层土壤; 并且小麦季生育期较长, 本试验设计一次性施肥, 在小麦生育后期灌水和降雨对土壤氮素影响较大。本试验条件下, 3 种氮肥对土壤全氮含量没有明显影响, 但新型氮肥的土壤全氮含量均值大于普通尿素, 表明了新型氮肥能够影响土壤表层氮含量, 而对土壤深层氮含量的影响需进一步研究。

4 结论

3 种氮肥 (普通尿素、控失尿素和腐植酸尿素), 小麦产量均随着施氮量的增加而增加。且均

在施氮量为 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 小麦产量最高, 分别为 7 371、7 970、7 070 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。与普通尿素和腐植酸尿素相比, 控失尿素分别增产了 8.1% 和 12.7%, 所以控失尿素的增产效果最好。

3 种氮肥均能显著增加小麦每公顷穗数, 并随着施氮量的增加而增加。普通尿素和腐植酸尿素都在施氮量为 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 达到最大, 分别为 498.6 万、597.0 万穗 $\cdot \text{hm}^{-2}$, 而控失尿素在施氮量为 $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 达到最大 (545.1 万穗 $\cdot \text{hm}^{-2}$)。控失尿素和腐植酸尿素平均小麦每公顷穗数比普通尿素提高了 12.8% 和 17.3%; 控失尿素和腐植酸尿素对小麦穗粒数的效果也优于普通尿素。其中腐植酸尿素对小麦穗粒数和千粒重有显著影响, 小麦穗粒数随施氮量的增加而增加。

3 种氮肥, 小麦地上部干物质积累量均随施氮量的增加呈现增加趋势。小麦地上部平均吸氮量表现为: 控失尿素 > 腐植酸尿素 > 普通尿素, 控失尿素的小麦地上部平均吸氮量最大, 为 $161.3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。3 种氮肥, 控失尿素小麦的平均氮肥利用率为 25.0%, 比腐植酸尿素和普通尿素分别提高了 6.1、9.6 个百分点。控失尿素在提高小麦氮肥利用率方面效果明显。综上, 从产量和氮肥利用率来看, 控失尿素不仅能够提高小麦产量和氮肥利用率, 还可以保持土壤氮素平衡, 降低环境风险; 并且控失尿素一次施用, 省时省力, 提高经济效益。因此, 在本研究中控失尿素施氮量为 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 小麦获得最大产量。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2017.
- [2] 马常宝, 卢昌艾, 任意, 等. 土壤地力和长期施肥对潮土区小麦和玉米产量演变趋势的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18 (4): 796-802.
- [3] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径 [J]. 土壤学报, 2008, 45 (5): 915-924.
- [4] 武俊喜, 陈新平, 贾良良, 等. 冬小麦/夏玉米轮作中高肥力土壤的持续供氮能力 [J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10 (1): 1-5.
- [5] 巨晓棠, 刘学军, 张福锁. 冬小麦与夏玉米轮作体系中氮肥效应及氮素平衡研究 [J]. 中国农业科学, 2002, 35 (11): 1361-1368.
- [6] 樊廷录, 周广业, 王勇, 等. 甘肃省黄土高原旱地冬小麦-玉米轮作制长期定位施肥的增产效果 [J]. 植物营养与肥料

- 学报, 2004, 10 (2): 127-131.
- [7] 刘学军, 赵紫娟, 巨晓棠, 等. 基施氮肥对冬小麦产量、氮肥利用率及氮平衡的影响 [J]. 生态学报, 2002, 22 (7): 1122-1128.
- [8] 李志勇, 王璞, Boening-Iilkens M, 等. 优化施肥和传统施肥对夏玉米生长发育及产量的影响 [J]. 玉米科学, 2003, 11 (3): 90-93.
- [9] 叶优良, 包兴国, 宋建兰, 等. 长期施用不同肥料对小麦/玉米间作产量、氮吸收利用和土壤硝态氮累积的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10 (2): 113-119.
- [10] 张伟纳, 刘宇娟, 董成, 等. 氮肥运筹对潮土冬小麦/夏玉米产量及氮肥利用率的影响 [J]. 土壤学报, 2019, 56(1): 165-175.
- [11] Zhang X Y, Liu C, Nepal S, et al. A hybrid approach for scalable sub-tree anonymization over big data using MapReduce on cloud [J]. Journal of Computer and System Sciences, 2014, 80 (5): 1008-1020.
- [12] 王宜伦, 卢艳丽, 刘举, 等. 专用缓释肥对夏玉米产量及养分吸收利用的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2015, (1): 29-32.
- [13] 卢艳丽, 白由路, 王磊, 等. 华北小麦-玉米轮作区缓控释肥应用效果分析 [J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(1): 209-215.
- [14] 李伟, 李絮花, 李海燕, 等. 控释尿素与普通尿素混施对玉米产量和氮肥效率的影响 [J]. 作物学报, 2012, 38 (4): 699-706.
- [15] 杨雯玉, 贺明荣, 王远军, 等. 控释尿素与普通尿素配施对冬小麦氮肥利用率的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11 (5): 627-633.
- [16] 何杰, 张敬昇, 王昌全, 等. 包膜控释氮肥配施尿素对冬小麦产量与氮素积累及利用的影响 [J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2018, 46 (3): 34-42.
- [17] 谭德水, 林海涛, 朱国梁, 等. 黄淮海东部冬小麦一次性施肥的产量效应 [J]. 中国农业科学, 2018, 51 (20): 70-79.
- [18] 周丽平, 杨俐苹, 白由路, 等. 不同氮肥缓释化处理对夏玉米田间氨挥发和氮素利用的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22 (6): 1449-1457.
- [19] 郑文魁, 李成亮, 窦兴霞, 等. 不同包膜类型控释氮肥对小麦产量及土壤生化性质的影响 [J]. 水土保持学报, 2016, 30 (2): 162-167.
- [20] 夏伟光, 武际, 高凤梅, 等. 控释尿素不同施用条件下冬小麦产量和氮素利用效应 [J]. 农业资源与环境学报, 2014, 31 (1): 38-44.
- [21] 刘红恩, 张胜男, 刘世亮, 等. 腐植酸尿素对冬小麦产量、养分吸收利用和土壤养分的影响 [J]. 西北农业学报, 2018, 27 (7): 944-952.
- [22] 袁天佑, 冀建华, 王俊忠, 等. 腐植酸与氮肥配施对冬小麦氮素吸收利用及产量的影响 [J]. 中国生态农业学报, 2017, 25 (3): 365-372.
- [23] Si Z X, Wang Y L, Han Y L, et al. Effects of continuous nitrogen application on grain yield and nitrogen uptake and utilization in winter wheat-summer maize rotation system [J]. Agricultural Science & Technology, 2013, 14 (3): 478-482.
- [24] 王宜伦, 苗玉红, 韩燕来, 等. 缓/控释氮肥对玉米氮代谢、氮素积累量及产量的影响 [J]. 土壤通报, 2012, 43 (1): 147-150.
- [25] 姬景红, 李玉影, 刘双全, 等. 控释掺混肥对春玉米产量、光合特性及氮肥利用率的影响 [J]. 土壤通报, 2015, 46 (3): 669-675.
- [26] 杨越超, 张民, 陈剑秋, 等. 控释氮肥对水稻秧苗形态特征和生理特性的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16 (5): 1126-1135.
- [27] Zhang Y, Wang H, Lei Q, et al. Optimizing the nitrogen application rate for maize and wheat based on yield and environment on the Northern China Plain [J]. Science of the Total Environment, 2018, 550: 469.
- [28] Cui Z, Zhang F S, Chen X P, et al. On-farm evaluation of an in-season nitrogen management strategy based on soil N min test [J]. Field Crops Research, 2008, 105 (1-2): 48-55.
- [29] 吕殿青, 同延安, 孙本华. 氮肥施用对环境污染影响的研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4 (1): 8-15.
- [30] 杨新泉, 冯锋, 宋长青, 等. 主要农田生态系统氮素行为与氮肥高效利用研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9 (3): 373-376.
- [31] 李久生, 李蓓, 宿梅双, 等. 冬小麦氮素吸收及产量对喷灌施肥均匀性的响应 [J]. 中国农业科学, 2005, 38 (8): 1600-1607.
- [32] 张敬昇, 李冰, 王昌全, 等. 控释氮肥与尿素掺混比例对作物中后期土壤供氮能力和稻麦产量的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23 (1): 110-118.
- [33] 孙晓, 景建元, 吕慎强, 等. 不同缓/控释尿素在黄土台塬区春玉米的减量施用效果 [J]. 中国生态农业学报, 2017, 25 (6): 848-855.
- [34] Calvo P, Nelson L, Kloepper J W. Agricultural uses of plant biostimulants [J]. Plant & Soil, 2014, 383 (1-2): 3-41.
- [35] 王汝娟, 王振林, 梁太波, 等. 腐植酸钾对食用甘薯品种钾吸收、利用和块根产量的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14 (3): 520-526.
- [36] 梁太波, 王振林, 刘娟, 等. 灌溉和旱作条件下腐植酸复合肥对小麦生理特性及产量的影响 [J]. 中国生态农业学报, 2009, 17 (5): 900-904.
- [37] Sieling K, Stahl C, Winkelmann C, et al. Growth and yield of winter wheat in the first 3 years of a monoculture under varying N fertilization in NW Germany [J]. European Journal of Agronomy, 2005, 22 (1): 71-84.
- [38] 刘艳丽, 丁方军, 谷端银, 等. 不同活化处理腐植酸-尿素对褐土小麦-玉米产量及有机碳氮矿化的影响 [J]. 土壤, 2015, 47 (1): 42-48.
- [39] 张树清, 刘秀梅, 冯兆滨. 腐植酸对氮、磷、钾的吸附和解

- 吸特性研究[J]. 腐植酸, 2007, (2): 15-21.
- [40] 刘增兵, 赵秉强, 林治安. 腐植酸尿素氮挥发特性及影响因素研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(1): 208-213.
- [41] 许俊香, 邹国元, 孙钦平, 等. 腐植酸尿素对土壤氮挥发和玉米生长的影响[J]. 土壤通报, 2013, 44(4): 934-939.
- [42] 于淑芳, 杨力, 张民, 等. 控释尿素对小麦-玉米产量及土壤氮素的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(9): 1744-1749.
- [43] 张宏, 周建斌, 刘瑞, 等. 不同栽培模式及施氮对半旱地冬小麦/夏玉米氮素累积、分配及氮肥利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(1): 1-8.
- [44] 刘艳丽, 丁方军, 张娟, 等. 活化腐植酸-尿素施用对小麦-玉米轮作土壤氮肥利用率及其控制因素的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(10): 1310-1319.
- [45] 岳克, 马雪, 宋晓, 等. 新型氮肥及施氮量对玉米产量和氮素吸收利用的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2018, (4): 81-87.

Effects of new-type and application rate of N-fertilizer on yield, nitrogen uptake and nitrogen use efficiency of wheat in wheat-summer maize rotation system

YUE Ke¹, ZHONG Wen-jin², SONG Xiao¹, ZHANG Ke-ke¹, GUO Dou-dou¹, HUANG Shao-min¹, YANG Zi-chao², ZHANG Shui-qing^{1*} (1. Institute of Plant Nutrition and Environmental Resources Science, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou Henan 450002; 2. Henan Xinlianxin Chemicals Group Co. Ltd., Xinxiang Henan 453700)

Abstract: In this paper, the effects of new-type N-fertilizers (release-controlled urea and humic acid-urea) and common urea on wheat yield, nitrogen uptake and nitrogen use efficiency were studied to explore the scientific and rational application of nitrogen and suitable nitrogen fertilizer varieties under wheat-maize rotation system in alluvial soil area of North China. Since June 2016, with no nitrogen fertilizer as control, three nitrogen fertilizers (release-controlled urea, humic acid-urea and common urea) and six nitrogen levels (0, 100, 150, 200, 250, 300 kg · hm⁻²), totally 16 treatments were set up on sandy alluvial soil of a modern agricultural research and development base in Henan province. The yield of winter wheat was measured at harvest and the yield components were counted. The results showed that the yield of winter wheat increased with the increasing nitrogen fertilizer. Compared with CK, the yield increased by 29.0% ~ 66.2%, 27.7% ~ 79.7%, 13.9% ~ 59.4% for the three fertilization treatments, in which the release-controlled urea was the best treatment, and it obtained the maximum yield of 7 970 kg · hm⁻² when nitrogen application was 300 kg · hm⁻², which was 8.1% and 12.7% higher than that of common urea and humic acid-urea treatments, respectively. With the increase of nitrogen fertilizer, The average spikes per hectare of wheat with release-controlled urea and humic acid-urea increased by 12.8% and 17.3% than that of common urea, respectively. The grain number per spike of wheat for the humic acid-urea treatments increased significantly with the increase of nitrogen application rate, when nitrogen application rate was 300 kg · hm⁻², the maximum grain number per spike was 34.6, which was 23.1% higher than that of common urea. For all the three kinds of urea treatments, nitrogen uptake accumulation of the above-ground parts of wheat increased with the increase of nitrogen fertilizer, which had the consistent pattern of wheat yield. Among them, the average nitrogen uptake was the highest in wheat shoot treated with release-controlled urea (161.3 kg · hm⁻²), followed by humic acid-urea treatment (154.7 kg · hm⁻²). Compared with common urea, average nitrogen use efficiency of release-controlled urea increased by 9.6%, which indicated that the application of release-controlled urea could improve the nitrogen use efficiency, partial productivity and agricultural efficiency of wheat. In the treatment of humic acid-urea, the utilization rate of nitrogen fertilizer increased with the increase of nitrogen use efficiency. New nitrogen fertilizers (release-controlled urea and humic acid-urea) can improve the nitrogen utilization efficiency of wheat by increasing the yield components, wheat yield and nitrogen uptake of wheat. Under the conditions of this experiment, the release-controlled urea was the best for increasing yield and nitrogen use efficiency. The maximum yield was achieved when nitrogen was applied at 300 kg · hm⁻².

Key words: new-type of N-fertilizer; nitrogen rate; winter wheat; yield; nitrogen uptake; nitrogen use efficiency; soil total N