

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.10.022

氮肥运筹对夏玉米氮素盈亏与利用的影响*

银敏华 李援农 谷晓博 周昌明 董丽利 张天乐

(西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要: 基于2年田间试验, 确立了尿素(纯氮0、80、160、240 kg/hm², 基追比为2:3)和控释氮肥(纯氮0、60、120、180、240 kg/hm², 一次性基施)运筹下夏玉米临界氮浓度稀释曲线模型, 据此构建氮素吸收模型、氮素营养指数模型和氮积累亏缺模型进行夏玉米氮素营养诊断, 并比较不同氮肥运筹的氮素利用效率。结果表明, 夏玉米临界氮浓度与地上部最大生物量间符合幂函数关系。利用独立试验数据对模型进行验证, 结果表明该模型可靠性较高(相对误差为0.46%~4.08%)。氮素营养指数模型和氮积累亏缺模型可用于诊断植株氮素营养并定量调控氮肥管理。尿素和控释氮肥的适宜施氮范围分别为160~174 kg/hm²和120~150 kg/hm²。与尿素相比, 控释氮肥的氮肥利用率显著提高, 获得理论最高产量时, 可节省氮肥用量约14%。

关键词: 夏玉米 氮肥运筹 临界氮浓度 氮素诊断 氮素利用效率

中图分类号: S513 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)10-0167-10

Effects of Nitrogen Application Rates on Nitrogen Surplus and Nitrogen Use Efficiency of Summer Maize

Yin Minhua Li Yuannong Gu Xiaobo Zhou Changming Dong Lili Zhang Tianle

(Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to explore the applicability of critical nitrogen dilution curve and the feasibility of nitrogen surplus evaluation for summer maize in Guanzhong Region, Shaanxi Province, two nitrogen fertilizers: urea (N 0, 80, 160 and 240 kg/hm², 40% of N fertilizer applied as basic and 60% top dressed at bell stage) and controlled-release fertilizer (N 0, 60, 120, 180 and 240 kg/hm², all applied as basic fertilization) were chosen to determine critical nitrogen concentration dilution curve based on field experiments in 2013 and 2014. Models of nitrogen uptake, nitrogen nutrition index and accumulative nitrogen deficit were established to diagnose nitrogen nutrition status of maize plant according to the critical nitrogen concentration. In addition, nitrogen use efficiency was compared among different nitrogen application rates treatments. The results showed that a negative power function correlation between maximum aboveground dry matter and critical nitrogen concentration was existed. Calibrations (using the data series of 2014) indicated that these models had high reliability with relative error of 0.46%~4.08%. The nitrogen nutrition index model and the accumulative nitrogen deficit model could be used to diagnose plant nitrogen status effectively and regulate nitrogen fertilizer management quantitatively. The appropriate nitrogen application rate of urea and controlled-release fertilizer for maize growth was 160~174 kg/hm² and 120~150 kg/hm², respectively. Compared with urea, controlled-release fertilizer could significantly increase the nitrogen use efficiency and save nitrogen amount approximately by 14% for maximum yield (urea: 10.73 t/hm²; controlled-release fertilizer: 11.01 t/hm²).

收稿日期: 2015-02-05 修回日期: 2015-04-06

* 公益性行业科研专项资助项目(201503105)和国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2011AA100504)

作者简介: 银敏华, 博士生, 主要从事节水灌溉新技术研究, E-mail: 15109217864@163.com

通讯作者: 李援农, 教授, 博士生导师, 主要从事节水灌溉新技术及3S技术应用研究, E-mail: liyuannong@163.com

The investigation is beneficial to the dynamic and precise fertilization, nitrogen management optimization and effective utilization of resources both on theoretical and technical sides.

Key words: Summer maize Nitrogen application rates Critical nitrogen concentration Nitrogen diagnosis Nitrogen use efficiency

引言

肥料作为粮食的“粮食”,在农业生产中发挥着重要的作用。目前,为了追求高产,普遍存在肥料投入量大、利用率低的现象,这不仅造成资源的严重浪费,还会带来一系列的环境问题^[1-3]。氮是玉米需求量最大的营养元素,合理的氮肥供应是调控生长发育,改善光合性能,实现高产优质的有效途径^[4-5]。如何在保证作物产量和品质的前提下,实现节本增效和环境友好的统一已引起广泛关注。研究表明,适当降低施氮量并提高拔节期追肥比例,有利于玉米根系生长和植株氮素累积,可有效减轻氮素淋失和反硝化作用^[6-7]。合理协调基、蘖、穗肥比例可显著改善光合产物的运转、分配和积累速率^[8]。适宜施氮量与追肥时期的耦合效应有助于养分的优化配置^[9]。化肥有机肥配施可协调土壤氮、磷、钾平衡,提高作物经济产量和肥料利用率^[10]。然而,无论何种氮肥运筹均会在一定程度上增加劳动投入和资源消耗。因此,氮素释放速率与作物需肥规律高度吻合,一次性基施满足生长需求,同时具备节本增效、品质提升、资源节约和环境友好的控释氮肥的研发与应用成为 21 世纪肥料产业的焦点^[11-12]。

及时有效地监测作物体内氮营养状况并以此为依据合理施肥,可实现氮素供需平衡和节能增效的目的。早在 1952 年,Ulrich^[13]提出了“临界氮浓度”的概念,即在一定生长时期内获得最大生物量时的最小氮浓度,且作物的氮浓度随生物量的增加而下降,二者存在幂函数关系。Lemaire 等^[14]首先将临界氮浓度稀释曲线模型应用于牧草。Greenwood 等^[15]和 Lemaire 等^[16]分别提出和修正了 C3、C4 作物的通用模型。此后,诸多研究者针对马铃薯^[17]、冬油菜^[18]、向日葵^[19]、棉花^[20]、番茄^[21]、小麦^[22]和玉米^[23]等作物分别建立了临界氮浓度稀释曲线模

型。基于临界氮浓度的氮素吸收、氮素营养指数和氮积累盈亏模型是对作物进行氮素营养诊断的有效方法^[24]。

目前,关于氮肥运筹的研究大多集中于不同施氮量、基追比例和追肥时期下氮素在土壤中的分布、运移,在植株体内的吸收、分配以及养分收支平衡等方面,而较少涉及盈亏评价体系。且现阶段国内外关于施用控释氮肥时作物氮浓度稀释曲线模型的研究较为缺乏,尤其是将控释氮肥应用于玉米的氮浓度稀释曲线至今尚未清楚。本文通过 2 年田间试验,对比研究基于氮浓度稀释曲线模型的尿素和控释氮肥的氮素盈亏评价及氮素利用效率,旨在探究临界氮浓度稀释曲线在我国陕西关中地区的适用性以及氮素盈亏评价的可行性,以期为夏玉米的精准施肥和节能增效提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2013 年和 2014 年 6—10 月,在西北农林科技大学教育部旱区农业水土工程重点实验室试验站进行。该区地处 108°24'E,34°20'N,海拔高度 521 m,全年无霜期 221 d,年均降水量 632 mm,年均蒸发量 1 500 mm。土壤质地为中壤土,0~1 m 土层平均田间持水率为 23%~25%,凋萎含水率为 8.5%(均为质量含水率),平均干容重为 1.44 g/cm³。2 年播前耕层土壤营养状况见表 1。气象资料由西北农林科技大学灌溉试验站提供。试验期间夏玉米全生育期降水量 2013 年为 269.5 mm,2014 年为 355.3 mm。

1.2 试验设计

供试玉米品种为“漯单 9 号”。试验用氮肥分别为尿素(含 N 质量分数 46%)和树脂膜控释氮肥(含 N 质量分数 42%),其中尿素设 4 个施氮水平

表 1 播前土壤营养状况
Tab.1 Soil nutrient conditions before sowing in two years

年份	pH 值	有机质质量比/ (g·kg ⁻¹)	全氮质量比/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮质量比/ (mg·kg ⁻¹)	速效磷质量比/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾质量比/ (mg·kg ⁻¹)
2013	8.14	11.18	0.94	76.01	25.22	131.97
2014	8.13	10.88	0.98	69.80	15.07	163.01

(纯 N), 即 0 (N₀)、80 (N₈₀)、160 (N₁₆₀)、240 kg/hm² (N₂₄₀), 基追比为 2:3, 追肥在大喇叭口期进行(分别为 2013 年 7 月 27 日和 2014 年 7 月 24 日); 树脂膜控释氮肥设 5 个施氮水平(纯 N), 即 0 (K₀)、60 (K₆₀)、120 (K₁₂₀)、180 (K₁₈₀)、240 kg/hm² (K₂₄₀), 于播前一次施入。各处理磷肥(过磷酸钙, P₂O₅ 质量分数为 16%) 120 kg/hm² (纯 P₂O₅) 和钾肥(硫酸钾, K₂O 质量分数为 50%) 60 kg/hm² (纯 K₂O) 全部做基肥。其他管理措施同一般高产田。试验共 8 个处理(不施氮处理共用), 每个处理重复 3 次, 共 24 个小区。行距 60 cm、株距 30 cm, 小区面积 20 m² (4 m × 5 m), 随机区组排列(2 年中同一小区施氮量固定)。试验区周围布设 2 m 宽保护带。2013 年 6 月 17 日播种, 10 月 10 日收获; 2014 年 6 月 15 日播种, 10 月 11 日收获。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 地上部生物量与产量的测定

于夏玉米十三叶展、吐丝期、吐丝后 12 d、吐丝后 24 d、吐丝后 40 d 和成熟期(分别为种植后 45、55、67、79、95、104 d), 各处理取代表性植株 5 株, 分茎、叶、穗 3 部分, 采用干燥法测定干物质量。采用 1 m² 的样方人工脱粒测产, 并换算成单位面积产量(t/hm²)。

1.3.2 植株各器官含氮量的测定

将各处理的干样分器官粉碎后, 过 80 目筛, 用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮法和凯氏定氮仪(FOSS 2300 型) 测定各器官全氮含量, 并计算植株全氮含量。各器官氮素含量为器官含氮量与器官干物质量的乘积, 其单位为 kg/hm²。所有器官氮素含量相加得地上部植株氮累积量。植株氮浓度为植株氮累积量与植株干物质量的比值, 其单位为 g/kg。

1.3.3 氮素利用效率的计算

根据籽粒产量及收获时植株氮素含量计算氮肥利用率、氮肥生理利用率、氮肥农学利用率和氮肥偏生产力。相关指标计算方法为

$$R_{EN} = \frac{C_N - C_0}{N} \times 100\%$$
 (1)

$$A_{EN} = \frac{Y_N - Y_0}{N}$$
 (2)

$$N_{PE} = \frac{Y_N - Y_0}{C_N - C_0}$$
 (3)

$$P_{EP} = \frac{Y_N}{N}$$
 (4)

式中 R_{EN} ——氮肥利用率, %
 A_{EN} ——氮肥农学利用率, kg/kg
 N_{PE} ——氮肥生理利用率, kg/kg

P_{EP} ——氮肥偏生产力, kg/kg
 C_N ——施氮区植株地上部氮积累量, kg/hm²
 C_0 ——不施氮区植株地上部氮积累量, kg/hm²
 Y_N ——施氮区籽粒产量, kg/hm²
 Y_0 ——不施氮区籽粒产量, kg/hm²
 N ——施氮量, kg/hm²

1.4 氮素营养指标的计算

1.4.1 临界氮浓度稀释曲线模型

建立作物临界氮浓度稀释曲线, 首先需要确定临界氮浓度。其确定方法有 2 种。

第 1 种方法由 Justes 等^[25] 提出, 具体步骤为: ①对各施氮处理的每次取样地上部生物量进行方差分析, 并根据作物生长是否受氮素限制分为氮制约组(作物生长受氮素供应不足的限制)和不受氮制约组(生长不受氮素制约)。②对氮制约组, 其地上部生物量与相应氮浓度值以线性拟合。③对不受氮制约组, 以其地上部生物量的平均值代表生物量的最大值。④每次取样日的理论临界氮浓度由上述线性与以最大生物量为横坐标的垂线的交点纵坐标确定。

第 2 种方法由 Herrmann 等^[26] 提出, 用于相邻氮素处理间生物量与氮含量结果相近、显著性不高的情形, 其认为植株生物量随氮含量增加呈先增加后趋缓最后不再增加的趋势, 将同一取样时期所得数据放在一起, 对生物量和氮含量以分段函数拟合。

本研究不同处理间生物量与氮含量差异显著, 且各取样时期数据未呈现较好的分段函数规律, 因此采用第一种方法建模。

按照 Lemaire 等^[27] 提出的临界氮浓度稀释曲线计算方法, 构建临界氮浓度稀释曲线模型为

$$N_c = aW_{\max}^{-b}$$
 (5)

式中 N_c ——临界氮浓度, g/kg
 a ——地上部生物量为 1 t/hm² 时植株的临界氮浓度, g/kg
 $W_{\max}$ ——植株地上部生物量的最大值, t/hm²
 b ——决定临界氮浓度稀释曲线斜率的统计学参数

在作物生长过程中, 若植株氮浓度位于该曲线之下, 表明氮素供应不足; 若氮浓度位于该曲线之上, 表明氮素供应过度; 若氮浓度与曲线相吻合, 则表明氮素供应适宜。

1.4.2 氮素吸收模型

作物在临界氮浓度条件下达到最大生物量时的氮吸收量为临界氮吸收量 N_{uptc} (kg/hm²), 即

$$N_{uptc} = 10N_c W_{\max}$$
 (6)

将式(5)代入式(6)为作物氮累积量与生物量之间的临界氮吸收模型,即

$$N_{uptc}=10aW_{max}^{1-b}\tag{7}$$

1.4.3 氮素营养指数模型

为了进一步明确作物氮素营养状况,Lemaire等^[27]提出了氮素营养指数(Nitrogen nutrition index, N_{NI})的概念,表示为

$$N_{NI}=\frac{N_t}{N_a}\tag{8}$$

式中 N_t ——地上部生物量氮浓度的实测值,g/kg
 N_a ——根据临界氮浓度稀释曲线模型求得的在相同地上部生物量时的氮浓度,g/kg

N_{NI} 可直观反映作物氮素营养状况,若 $N_{NI}=1$,表明氮素营养适宜;若 $N_{NI}>1$,表明氮素营养过剩;若 $N_{NI}<1$,表明氮素营养不足。

1.4.4 氮积累亏缺模型

根据式(5)可推出氮积累亏缺模型,推导过程参考文献[28],模型为

$$N_{and}=N_{uptc}-N_t\tag{9}$$

式中 N_{and} ——氮亏缺值,kg/hm²
若 $N_{and}>0$,表明氮积累不足,反之则氮积累过量。

1.5 数据分析

利用回归拟合方法建立临界氮浓度稀释曲线模型(2013年),基于独立测定数据(2014年)对模型

进行验证。采用 Microsoft Excel 2007 和 SPSS 19.0 软件对试验数据进行整理和分析,使用 Origin Pro 8.5 软件作图。

2 结果与分析

2.1 夏玉米临界氮浓度稀释曲线模型的构建

2.1.1 氮肥运筹对夏玉米地上部生物量效应分析

不同氮肥运筹下夏玉米地上部生物量动态累积过程如表2所示。由表2分析知,不同氮素类型、施氮水平和取样时期,夏玉米地上部生物量的变化范围为1.01~14.65 t/hm²。同一取样时期,随施氮水平的增加,夏玉米地上部生物量呈先增加后平稳的趋势,说明一定范围内提高施氮水平可促进植株生长,而施氮过度则造成氮肥供过于求,无法被植株吸收利用。2种氮肥夏玉米地上部生物量满足统计意义上的不等式,即尿素: $W_0 < W_{80} < W_{160} = W_{240}$;控释氮肥: $W_{*0} < W_{*60} < W_{*120} = W_{*180} = W_{*240}$ 。式中 W_0 、 W_{80} 、 W_{160} 、 W_{240} 表示 N_0 、 N_{80} 、 N_{160} 、 N_{240} 施氮水平下夏玉米地上部生物量; W_{*0} 、 W_{*60} 、 W_{*120} 、 W_{*180} 、 W_{*240} 表示 K_0 、 K_{60} 、 K_{120} 、 K_{180} 、 K_{240} 施氮水平下夏玉米地上部生物量。

2种氮素夏玉米地上部生物量的最高值无显著性差异($P<0.05$),但与尿素相比,控释氮肥达到统计意义上最高生物量所需的最小施氮量较低,前者为160 kg/hm²,后者为120 kg/hm²。

表2 氮肥运筹对夏玉米地上部生物量动态累积的影响

Tab.2 Effects of nitrogen application rates on dynamic accumulation of summer maize aboveground biomass

		t/hm ²					
氮源处理		生育阶段					
		十三叶展	吐丝期	吐丝后 12 d	吐丝后 24 d	吐丝后 40 d	成熟期
尿素	N0	1.01±0.06 ^d	3.61±0.11 ^c	5.83±0.26 ^c	6.99±0.31 ^c	8.23±0.59 ^c	10.71±0.22 ^c
	N80	1.29±0.02 ^c	4.59±0.09 ^b	6.99±0.31 ^b	8.03±0.28 ^b	9.31±0.46 ^b	12.01±0.17 ^{bc}
	N160	1.83±0.10 ^b	5.21±0.05 ^a	8.20±0.09 ^a	10.32±0.06 ^a	12.06±0.21 ^a	14.42±0.71 ^a
	N240	2.14±0.09 ^a	5.62±0.16 ^a	8.11±0.52 ^a	11.01±0.35 ^a	11.91±0.26 ^a	13.27±0.36 ^{ab}
控释氮肥	K0	1.01±0.06 ^d	3.61±0.09 ^d	5.83±0.11 ^c	6.99±0.16 ^d	8.23±0.21 ^c	10.71±0.57 ^c
	K60	1.31±0.07 ^c	4.43±0.05 ^c	7.05±0.26 ^b	8.71±0.29 ^c	9.16±0.66 ^{bc}	11.95±0.48 ^{bc}
	K120	1.79±0.03 ^b	5.06±0.13 ^b	8.21±0.49 ^{ab}	10.26±0.56 ^{bc}	11.56±0.86 ^{ab}	13.32±0.66 ^{ab}
	K180	2.01±0.09 ^a	5.15±0.08 ^b	8.51±0.51 ^a	10.55±0.33 ^{ab}	12.29±0.72 ^a	14.65±0.76 ^a
	K240	2.03±0.16 ^a	5.31±0.12 ^a	8.39±0.58 ^a	11.10±0.40 ^a	12.02±0.39 ^a	14.59±0.21 ^a

注:数据为3个重复的平均值±标准差,同列数据后不同小写字母表示在 $P<0.05$ 水平差异显著,下同。

2.1.2 氮肥运筹对夏玉米产量效应分析

将2种氮肥的施氮水平与其对应的产量进行拟合,得到如图1所示的二次曲线。由图1分析知,施用尿素和控施氮肥时均表现为随施氮水平的提高,产量显著增加,但当施氮水平超过一定范围后产量不仅没有增加反而有所降低。由拟合曲线可得,施用尿素时夏玉米理论适宜施氮量为174 kg/hm²,最

高产量为10.73 t/hm²;施用控释氮肥时夏玉米理论适宜施氮量为150 kg/hm²,最高产量为11.01 t/hm²。

以上分析表明,夏玉米地上部生物量和产量均与施氮水平密切相关。适宜的施氮量有利于植株生长及最终产量的形成。一定施氮量范围内,生物量与产量均随施氮量的增加而增加,当施氮量达到一定水平后,继续增加施氮量,生物量基本维持在一个

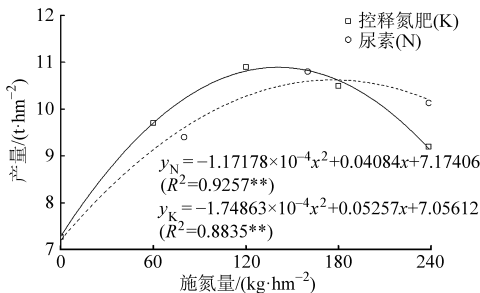


图 1 氮肥运筹对夏玉米产量的影响
Fig. 1 Effects of nitrogen application rates on summer maize yield

统计学意义上相等的范围内,而产量却有下降的趋

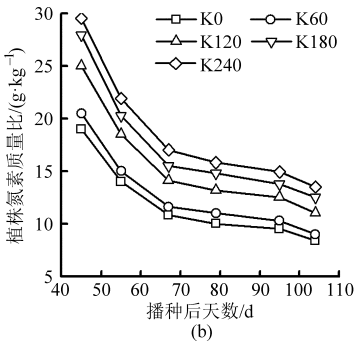
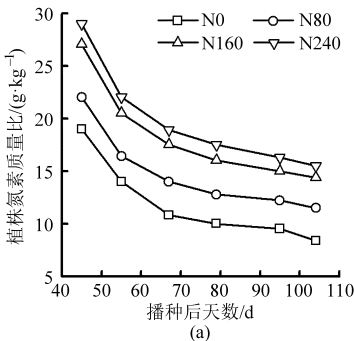


图 2 不同氮肥运筹下夏玉米植株氮素含量动态变化
Fig. 2 Dynamic changes of nitrogen concentration in summer maize plant under different nitrogen application rates
(a) 尿素 (b) 控释氮肥

按照 1.4.1 节中临界氮浓度稀释曲线模型的构建方法,将不同氮肥运筹夏玉米地上部生物量与对应氮浓度进行回归曲线拟合,得到每次取样的临界氮浓度。根据临界氮浓度及相应的地上部生物量,建立夏玉米全生育期临界氮浓度稀释曲线和幂函数方程如图 3 所示。2 种氮肥拟合方程的决定系数分别为 0.958 和 0.971,拟合度均达到极显著水平,说明该模型可以很好地解释夏玉米植株临界氮浓度与地上部生物量之间的关系。

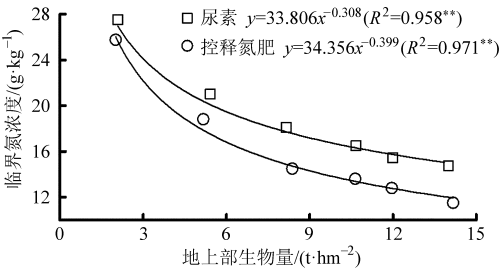


图 3 夏玉米地上部生物量的氮浓度稀释曲线
Fig. 3 Nitrogen concentration dilution curves in aboveground biomass of summer maize

比较 2 种氮肥临界氮浓度稀释模型可知,地上部生物量一定时,尿素对应的氮浓度较控释氮肥高,两者相差 6.33% ~ 12.54%。可见,与尿素相比,控释氮肥的有效性较高,吸收较少的氮素便可获得较高的生物量。

势。可见,夏玉米在生长过程中存在一定的临界氮素吸收量,且与尿素相比,控释氮肥的临界氮素吸收量较小。

2.1.3 临界氮浓度稀释曲线模型的建立

2 种氮肥不同施氮水平下夏玉米植株氮素含量随地上部生物量的动态变化如图 2 所示。由图 2 分析知,施用 2 种氮肥时,植株氮素含量均表现为随施氮水平的提高而增加,随地上部生物量的增加而下降的趋势。施用尿素和控释氮肥下植株氮素含量(质量比)变化范围分别为 8.4 ~ 29.1 g/kg 和 8.4 ~ 29.5 g/kg。

2.2 不同氮肥运筹下夏玉米氮素营养诊断

2.2.1 基于氮素吸收模型的夏玉米氮营养调控

根据异速生长模型式(7)可得各取样日夏玉米临界氮素积累量,图 4 为不同氮肥运筹下夏玉米氮素吸收量与临界氮素积累量的关系。

由图 4 分析知,2 种氮肥不同施氮水平下氮素吸收量与临界氮素积累量的相对误差(各拟合直线斜率与 1 的相对误差)分别为:尿素 28.50%、22.00%、3.60% 和 5.01%;控释氮肥 26.08%、20.19%、3.18%、8.05% 和 16.82%。说明 2 种氮肥的适宜施氮水平分别为 160 kg/hm² (尿素)和 120 kg/hm² (控释氮肥)。这与 2.1.1 节中不同氮肥运筹对夏玉米地上部生物量效应的分析结果一致。

2.2.2 基于氮营养指数模型的夏玉米氮营养调控

图 5 为根据氮素营养指数模型式(8)计算所得的不同氮肥运筹夏玉米 N_{NI} 随播种后天数的动态变化。由图 5 分析可知,不同氮素类型和施氮水平下夏玉米地上部 N_{NI} 变化趋势一致,均呈现出一定程度的波动状态,且随施氮水平的提高, N_{NI} 值增大。

2 种氮肥的 N_{NI} 在 0.66 ~ 1.23 之间变动。施用尿素时,整个生育期中 N0 和 N80 处理的 N_{NI} 值均始终低于 1,表现为氮营养供应不足,其中 N0 处理由于没有追施氮肥,拔节后期 N_{NI} 值逐渐下降;N80 处

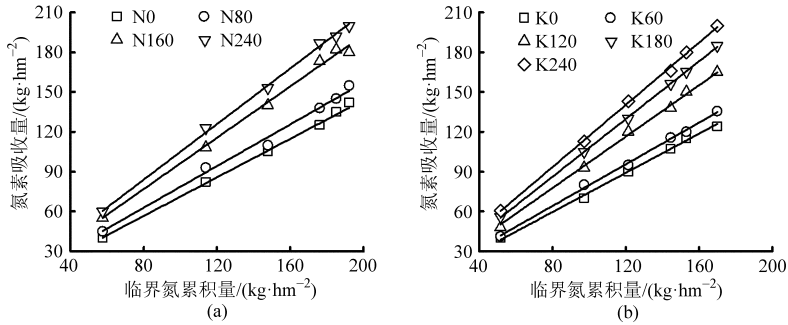


图 4 不同氮肥运筹下夏玉米氮素吸收量与临界氮累积量的关系

Fig. 4 Comparison of nitrogen uptake and critical nitrogen accumulation for maize under different nitrogen application rates

(a) 尿素 (b) 控释氮肥

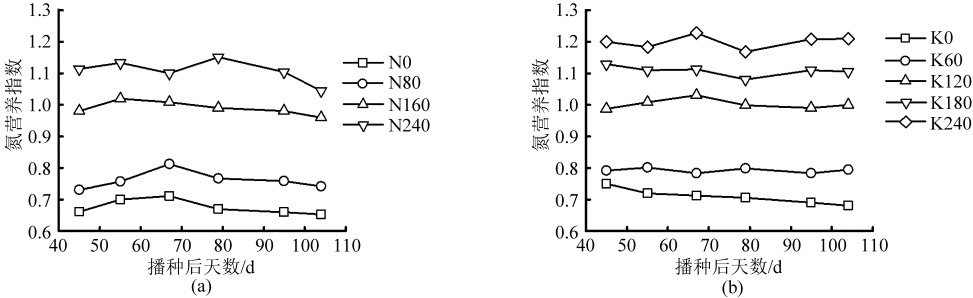


图 5 不同氮肥运筹夏玉米氮素营养指数动态变化

Fig. 5 Dynamic changes of nitrogen nutrition index of summer maize under different nitrogen application rates

(a) 尿素 (b) 控释氮肥

理拔节期追施氮肥后 N_{NI} 有所提高,但由于数量较少,仍无法满足植株生长需求。 N_{240} 处理的 N_{NI} 值始终大于 1,表现为氮营养严重过剩,而 N_{160} 处理的 N_{NI} 值则初期略高于 1,之后基本接近于 1,说明适宜的施氮水平应在 160 kg/hm^2 左右。与尿素相比,施用控释氮肥各处理在夏玉米整个生长过程中 N_{NI} 值变幅较小,且 K_{120} 处理的 N_{NI} 值始终接近于 1,是合理的施氮水平,而 K_{60} 、 K_{180} 和 K_{240} 处理或营养不足或营养过剩,均不利于氮素的有效利用。可见, N_{NI} 可作为定量诊断植株营养状况与调控施肥水平的指标。控释氮肥的适宜施氮水平较尿素低,其养分释放速率与作物需肥规律协调统一的特性有助于养分的高效利用。

2.2.3 基于氮积累亏缺模型的夏玉米氮营养调控

图 6 为不同氮肥运筹下夏玉米植株临界需氮量与氮素累积量差值的动态分布状况。由图 6 分析知,在夏玉米生长前期,不同氮肥运筹植株氮素累积值与临界需求量差异较小,随生育期推进则呈现或低于或高于临界需求量的两极分化。且随施氮水平的提高,尿素和控释氮肥的亏缺值均逐渐减少,其变幅分别为 $-9.84 \sim 55.16\text{ kg/hm}^2$ 和 $-29.96 \sim 44.21\text{ kg/hm}^2$ 。

施用尿素时, N_0 和 N_{80} 处理的氮素累积值明显低于临界需求量; N_{240} 处理尽管前期氮累积量与需求值相近,但中后期氮素积累过剩,不利于氮素的充分利用;只有 N_{160} 处理的氮素累积与需求量最

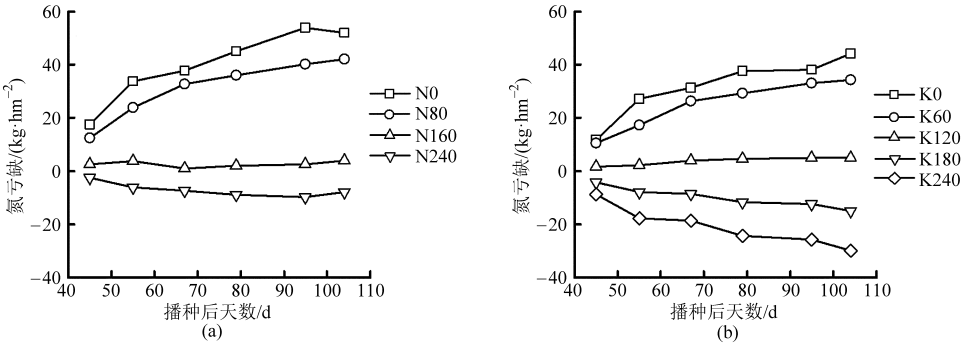


图 6 不同氮肥运筹夏玉米氮亏缺动态变化

Fig. 6 Dynamic changes of accumulative nitrogen deficit of summer maize under different nitrogen application rates

(a) 尿素 (b) 控释氮肥

为接近,但略低于需求量,说明适宜的施氮水平应略高于 160 kg/hm²。施用控释氮肥时,K0、K60 处理与 K180、K240 处理的氮亏缺值表现为明显的两极分化,前者供不应求,而后者供过于求,均不是合理的施氮水平,K120 处理的氮亏缺值始终在 0 附近,但略高于 0,说明合理的施氮水平应略高于 120 kg/hm²。这与 2.1.2 节中氮肥运筹对夏玉米产量效应的结果一致。

就 2 种氮肥而言,与 N240 处理相比,K180 和

K240 处理的氮亏缺值均较小。可见,控释氮肥独特的养分释放规律,可有效减少氮素的淋失、挥发和渗漏等损失,在实现相同目标效应的同时,可大幅度减少肥料施用量。

2.3 夏玉米临界氮浓度稀释曲线模型的验证

利用 2014 年不同氮肥运筹试验结果对所建立的夏玉米临界氮浓度稀释曲线模型(2013 年)进行验证(表 3)。

表 3 临界氮浓度预测值与实测值比较
Tab.3 Comparison of predicted and measured values of critical nitrogen concentration

氮源	项目	生育阶段					
		十三叶展	吐丝期	吐丝后 12 d	吐丝后 24 d	吐丝后 40 d	成熟期
尿素	预测值/(g·kg ⁻¹)	27.10	20.31	17.76	16.41	15.79	15.21
	实测值/(g·kg ⁻¹)	26.14	19.53	18.26	16.92	16.31	15.28
	相对误差/%	3.67	3.99	2.74	3.01	3.19	0.46
控释氮肥	预测值/(g·kg ⁻¹)	26.48	18.08	14.80	13.55	12.97	12.21
	实测值/(g·kg ⁻¹)	27.01	17.43	15.43	13.30	12.71	11.84
	相对误差/%	1.96	3.73	4.08	1.88	2.05	3.13

注:分别以 N160 和 K120 处理为例进行比较。

按照 Justes 等^[25]的计算方法,2014 年生长季,施用尿素和控释氮肥 2 种氮肥时,夏玉米从十三叶展到成熟期最大生物量分别为 1.08 ~ 14.59 t/hm²和 1.08 ~ 14.72 t/hm²。各取样日实测氮浓度值与依据图 3 中模型预测的氮浓度值间相对误差分别为

0.46% ~ 3.99% 和 1.88% ~ 4.08%。可见,临界氮浓度模型具有较好的可靠性。

2.4 不同氮肥运筹对夏玉米氮素利用效率的影响

利用 2 年试验数据平均值计算所得的不同氮肥运筹下氮肥利用效率如表 4 所示。

表 4 不同氮肥运筹对氮素利用效率的影响
Tab.4 Effects of different nitrogen application rates on nitrogen use efficiency

氮源	处理	氮肥农学利用率/(kg·kg ⁻¹)	氮肥生理利用率/(kg·kg ⁻¹)	氮肥偏生产力/(kg·kg ⁻¹)	氮肥利用率/%
尿素	N0	—	—	—	—
	N80	26.61 ± 0.45 ^c	59.60 ± 0.74 ^c	117.50 ± 1.23 ^b	44.65 ± 0.45 ^{bc}
	N160	22.06 ± 0.41 ^d	56.15 ± 0.58 ^d	67.50 ± 0.81 ^d	39.28 ± 0.44 ^d
	N240	8.04 ± 0.29 ^e	22.40 ± 0.40 ^e	38.33 ± 0.41 ^e	35.88 ± 0.38 ^e
控释氮肥	K0	—	—	—	—
	K60	40.48 ± 0.62 ^a	77.17 ± 0.92 ^a	161.67 ± 1.36 ^a	52.46 ± 0.67 ^a
	K120	31.07 ± 0.40 ^b	67.24 ± 0.69 ^b	91.67 ± 0.74 ^c	46.22 ± 0.49 ^b
	K180	18.49 ± 0.32 ^e	42.30 ± 0.38 ^e	58.89 ± 0.47 ^c	43.72 ± 0.55 ^c
	K240	11.91 ± 0.39 ^f	33.50 ± 0.41 ^f	42.20 ± 0.60 ^f	35.54 ± 0.51 ^c

由表 4 分析知,施用 2 种氮肥时,4 种氮素利用效率均表现为随施氮水平的提高而显著降低。与尿素相比,施用控释氮肥可显著提高氮素利用效率。其中,K120 处理的氮肥农学利用率、氮肥生理利用率、氮肥偏生产力和氮肥利用率可分别较 N180 提高 40.89%、19.75%、35.80% 和 17.65%。这可能是由于控释氮肥在早期养分释放量少,可有效促进夏玉米根系的垂直生长。随着生育期的推进,植株对氮素的需求量逐渐增大,氮素释放速率迅速加快,根系吸氮能力也相应增强,可形成一个和谐的供需模式,有助于土壤氮向植株氮的迁移和转化。而尿

素为速效氮肥,前期土壤养分过高,但植株吸收养分的能力有限,大量氮素极易通过淋溶、径流和挥发等途径损失,不利于植株中后期对氮素的吸收利用。

3 讨论

3.1 玉米临界氮浓度稀释曲线模型

作物氮浓度稀释现象的产生归因于以下 2 个过程:①植株冠层相互遮阴。②作物生长过程中叶片与茎秆干物质比例的变化^[27]。近年来,一些学者构建了不同地区不同作物的临界氮浓度稀释模型^[17-23],针对玉米的临界氮浓度稀释模型也有所涉

及。Plénet 等^[29]建立了玉米临界氮浓度与地上部生物量的幂函数曲线模型($N_c = 34.0D_w^{-0.37}$),限定该模型仅适用于生物量大于 1 t/hm^2 至吐丝后 25 d 期间。此后 Herrmann 等^[26]证明该模型的适用范围可拓展至成熟期,但 a 、 b 参数略有不同($N_c = 34.12D_w^{-0.391}$)。随后在澳大利亚^[30]和加拿大^[31]的研究同样证实了该曲线的适用性。在国内,梁效贵等^[23]构建了华北地区夏玉米的临界氮浓度稀释曲线模型($N_c = 34.914D_w^{-0.4134}$),认为该模型可用于华北地区夏玉米临界氮含量的预测。本研究构建了陕西关中地区夏玉米施用不同氮肥时的临界氮浓度稀释曲线模型(尿素: $N_c = 33.806D_w^{-0.308}$;控释氮肥: $N_c = 34.356D_w^{-0.399}$)。与前人建立的模型相比,形式基本相同,但参数略有差异。这种差异产生的原因可能是:①不同玉米品种的生长形态和生理机制有所区别。②氮素水平设置、土壤营养状况和气候环境因子等存在差异。就本研究而言,施用尿素和控释氮肥所得的临界氮稀释曲线模型参数不同,这可能与 2 种氮肥的养分释放特性有关。利用 2014 年不同氮肥运筹独立试验数据对模型进行检验,发现该模型在不同年际间具有较好的可靠性。本研究通过 2 年大田数据构建并验证了临界氮浓度稀释曲线模型,但仅是同一生态地点、单一品种下构建的。今后需要通过不同生态地区和不同品种的试验资料进行检验并不断完善,以进一步实现模型估测的普适性。

3.2 玉米氮素营养诊断

准确有效地诊断植株氮素营养是合理施肥的基础。研究发现, N_{NI} 不仅可以诊断作物生育期中植株氮素营养状况,还可以量化作物受氮胁迫的强度^[32]。赵犇等^[22]利用氮素营养指数对小麦生育期内营养状况进行诊断,发现小麦 N_{NI} 一般为 $0.37 \sim 1.28$,且随施氮水平的提高而增大。梁效贵等^[23]研究了 N_{NI} 与相对氮积累量、相对地上部生物量和相对产量之间的关系,发现 N_{NI} 与该 3 个物理量间存在显著的相关性,认为利用 N_{NI} 评价植株氮营养状况是可行的。本研究表明,2 种氮素的 N_{NI} 在 $0.66 \sim 1.23$ 之间变动。与尿素相比,施用控释氮肥各处理在夏玉米整个生育过程中 N_{NI} 值变幅较小。

氮亏缺模型可定量确定作物生育过程中的施肥量。赵犇等^[22]利用氮亏缺模型对不同生育期小麦的氮素营养进行诊断,发现 150 、 225 kg/hm^2 处理的氮亏缺值在 0 附近波动,为适宜的施氮量。本研究

表明,在夏玉米生长前期,不同氮肥运筹植株氮累积值与临界需求量差异较小,随生育期推进则呈现或低于或高于临界需求量的两极分化。尿素和控释氮肥的适宜施氮水平分别为略高于 160 kg/hm^2 和略高于 120 kg/hm^2 。

3.3 控释氮肥的节能增产效应

传统氮肥利用率低下主要归因于以下 3 方面:①常规尿素及复混肥料为速溶性肥料,施入土壤后养分迅速释放,导致土壤中铵态氮和硝态氮浓度急剧升高,氮素流失显著增加。②养分释放特性与作物需求规律严重错位。③氮素不稳定,易通过挥发、径流和渗漏等多种途径散失^[33]。而新型控释氮肥具有养分供应能力与作物需肥要求高度统一,一次性施肥即可满足作物整个生育期需求,在显著减少氮素流失和环境污染的同时提高肥料利用率和作物产量等多重功效。研究表明,与尿素相比,相同施氮水平下,控释氮肥处理的玉米穗位叶光合速率、叶绿素含量和籽粒灌浆速率显著提高^[34]。控释氮肥可促进水稻生育中后期叶片中硝酸还原酶和谷氨酰胺合成酶的活性,从而加强水稻孕穗期对氮素的吸收与同化,提高氮素利用率^[35]。控释氮肥的肥料利用效率可较速效氮肥提高 $10\% \sim 30\%$,在目标产量相同的情况下,可减少用量 $10\% \sim 40\%$ ^[9]。本研究也有类似的结论,即与尿素相比,控释氮肥达到最高生物量所需的施氮量较小,生物量一定时,施用控释氮肥的植株吸氮量较低,且氮肥农学利用率、氮肥生理利用率、氮肥偏生产力和氮肥利用率显著提高。将 2 种氮肥的施氮量与产量进行拟合发现,实现理论最高产量时,施用控释氮肥可较尿素节省氮肥用量约 14% 。

4 结论

(1)夏玉米植株地上部生物量与氮浓度间符合临界氮浓度稀释曲线模型,尿素为 $N_c = 33.806D_w^{-0.308}$,控释氮肥为 $N_c = 34.356D_w^{-0.399}$,该模型具有一定的可靠性。

(2)基于临界氮浓度构建的氮素吸收模型、氮素营养指数模型和氮积累亏缺模型对夏玉米生育期内氮素营养诊断结果一致,综合施氮量与产量的拟合曲线,尿素和控释氮肥的适宜施氮范围分别为 $160 \sim 174\text{ kg/hm}^2$ 和 $120 \sim 150\text{ kg/hm}^2$ 。

(3)与尿素相比,控释氮肥的氮肥利用率显著提高。获得理论最高产量时,施用控释氮肥可较尿素节省氮肥用量约 14% 。

参 考 文 献

- 1 Hellebrand H J, Scholz V, Kern J. Fertiliser induced nitrous oxide emissions during energy crop cultivation on loamy sand soils [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(36): 8403 – 8411.
- 2 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, 119.
Yue Wenjun, Zhang Fucang, Li Zhijun, et al. Effects of water and nitrogen coupling on nitrogen uptake of muskmelon and nitrate accumulation in soil [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(2): 88 – 96, 119. (in Chinese)
- 3 咎亚玲, 王朝辉, 周玲, 等. 不同养分投入的各品种小麦产量及养分效率差异研究[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(9): 91 – 98.
Zan Yaling, Wang Chaohui, Zhou Ling, et al. Use efficiency of different winter wheat cultivars response to different nutrient inputs [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(9): 91 – 98. (in Chinese)
- 4 李潮海, 刘奎, 周苏玫, 等. 不同施肥条件下夏玉米光合对生理生态因子的响应[J]. *作物学报*, 2002, 28(2): 265 – 269.
Li Chaohai, Liu Kui, Zhou Sumei, et al. Response of photosynthesis to eco-physiological factors of summer maize on different fertilizer amounts [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2002, 28(2): 265 – 269. (in Chinese)
- 5 李新伟, 吕新, 张泽, 等. 棉花氮素营养诊断与追肥推荐模型[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(12): 209 – 214.
Li Xinwei, Lü Xin, Zhang Ze, et al. Diagnosis of nitrogen nutrition and recommended model of topdressing for cotton [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(12): 209 – 214. (in Chinese)
- 6 鱼欢, 杨改河, 王之杰. 不同施氮量及基追比例对玉米冠层生理性状和产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(2): 266 – 273.
Yu Huan, Yang Gaihe, Wang Zhijie. Nitrogen rate and timing considerations on yield and physiological parameters of corn canopy [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(2): 266 – 273. (in Chinese)
- 7 Randall G W, Vetsch J A, Huffman J R. Corn production on a subsurface-drained mollisol as affected by time of nitrogen application and nitrpyrin [J]. *Agronomy Journal*, 2003, 95(5): 1213 – 1219.
- 8 任万军, 伍菊仙, 卢庭启, 等. 氮肥运筹对免耕高留茬抛秧稻干物质积累、运转和分配的影响[J]. *四川农业大学学报*, 2009, 27(2): 162 – 166.
Ren Wanjun, Wu Juxian, Lu Tingqi, et al. Effects of nitrogen strategies on dry matter accumulation, transformation and distribution of broadcasted rice among high standing-stubbles under no-tillage condition [J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2009, 27(2): 162 – 166. (in Chinese)
- 9 姜涛. 氮肥运筹对夏玉米产量、品质及植株养分含量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(3): 559 – 565.
Jiang Tao. Effects of nitrogen application regime on yield, quality and plant nutrient contents of summer maize [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2013, 19(3): 559 – 565. (in Chinese)
- 10 徐明岗, 李冬初, 李菊梅, 等. 化肥有机肥配施对水稻养分吸收和产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(10): 3133 – 3139.
Xu Minggang, Li Dongchu, Li Jumei, et al. Effects of organic manure application combined with chemical fertilizers on nutrients absorption and yield of rice in Hunan of China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(10): 3133 – 3139. (in Chinese)
- 11 陈建生, 徐培智, 唐栓虎, 等. 一次基施水稻控释肥技术的养分利用率及增产效果[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(10): 1868 – 1871.
Chen Jiansheng, Xu Peizhi, Tang Shuanhu, et al. Nutrient use efficiency and yield-increasing effect of single basal application of rice specific controlled release fertilizer [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(10): 1868 – 1871. (in Chinese)
- 12 樊小林, 刘芳, 廖照源, 等. 我国控释肥料研究的现状和展望[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(2): 463 – 473.
Fan Xiaolin, Liu Fang, Liao Zhaoyuan, et al. The status and out-look for the study of controlled-release fertilizers in China [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2009, 15(2): 463 – 473. (in Chinese)
- 13 Ulrich A. Physiological bases for assessing the nutritional requirements of plants [J]. *Annual Review of Plant Physiologic*, 1952, 3(1): 207 – 228.
- 14 Lemaire G, Salette J. Croissance estivale en matiere seche de peuplements de fetuque elevee (*Festuca arundinacea* Schreb) et de dactyle (*Dactylis glomerata* L.) dans l'ouest de la France: I. Etude en conditions de nutrition azotee et d'alimentation hydrique non limitantes [J]. *Agronomie*, 1987, 7(6): 373 – 380.
- 15 Greenwood D J, Gosse L G, Cruz P, et al. Decline in percentage N of C3 and C4 crops with increasing plant mass [J]. *Annals of Botany*, 1990, 66(4): 425 – 436.
- 16 Lemaire G, Gastal F, Cruz P, et al. Relationships between plant-N, plant mass and relative growth rate for C3 and C4 crop [C] // *Proceedings of the First ESA Congress*, 1990: 1 – 5.
- 17 Giletto C M, Echeverría H E. Critical nitrogen dilution curve for processing potato in Argentinean humid pampas [J]. *American Journal of Potato Research*, 2012, 89(2): 102 – 110.

- 18 Colnenne C, Meynard J M, Reau R. Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter oilseed rape [J]. *Annals of Botany*, 1998, 81(2): 311–317.
- 19 Debaeke P, van Oosterom E J, Justes E, et al. A species specific critical nitrogen dilution curve for sunflower(*Helianthus annuus* L.) [J]. *Field Crops Research*, 2012, 136: 76–84.
- 20 薛晓萍,陈兵林,郭文琦,等. 棉花临界需氮量动态定量模型[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(12): 2363–2370.
Xue Xiaoping, Chen Binglin, Guo Wenqi, et al. Dynamic quantitative model of critical nitrogen demand of cotton [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(12): 2363–2370. (in Chinese)
- 21 王新,马富裕,刁明,等. 滴灌番茄临界氮浓度、氮素吸收和氮营养指数模拟[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(18): 99–108.
Wang Xin, Ma Fuyu, Diao Ming, et al. Simulation of critical nitrogen concentration, nitrogen uptake and nitrogen nutrition index of processing tomato with drip irrigation [J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(18): 99–108. (in Chinese)
- 22 赵森,姚霞,田永超,等. 基于临界氮浓度的小麦地上部氮亏缺模型[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(11): 3141–3148.
Zhao Ben, Yao Xia, Tian Yongchao, et al. Accumulative nitrogen deficit models of wheat aboveground part based on critical nitrogen concentration [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(11): 3141–3148. (in Chinese)
- 23 梁效贵,张经廷,周丽丽,等. 华北地区夏玉米临界氮稀释曲线和氮营养指数研究[J]. *作物学报*, 2013, 39(2): 292–299.
Liang Xiaogui, Zhang Jingting, Zhou Lili, et al. Critical nitrogen dilution curve and nitrogen nutrition index for summer maize in north China plain [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39(2): 292–299. (in Chinese)
- 24 Greenwood D J, Gastal F, Lemaire G. Growth rate and % N of field grown crops: theory and experiments[J]. *Annals of Botany*, 1991, 67(2): 181–190.
- 25 Justes E, Mary B, Meynard J M, et al. Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter wheat crops [J]. *Annals of Botany*, 1994, 74(4): 397–407.
- 26 Herrmann A, Taube F. The range of the critical N dilution curve for maize(*Zea mays* L.) can be extended until silage maturity [J]. *Agronomy Journal*, 2004, 96(4): 1131–1138.
- 27 Lemaire G, Onillon B, Onillon G, et al. Nitrogen distribution within a Lucerne canopy during regrowth: relation with light distribution [J]. *Annals of Botany*, 1991, 68(6): 483–488.
- 28 Lemaire G, Jeuffroy M H, Gastal F. Diagnosis tool for plant and crop N status in vegetative stage: theory and practices for crop N management [J]. *European Journal of Agronomy*, 2008, 28(4): 614–624.
- 29 Plénet D, Lemaire G. Relationships between dynamics of nitrogen uptake and dry matter accumulation in maize crops, determination of critical N concentration [J]. *Plant and Soil*, 1999, 216(1–2): 65–82.
- 30 Lemaire G, Oosterom E V, Sheehy J, et al. Is crop N demand more closely related to dry matter accumulation or leaf area expansion during vegetative growth [J]. *Field Crops Research*, 2007, 100: 91–106.
- 31 Ziadi N, Brassard M, Bélanger G, et al. Critical N curve and N nutrition index for corn in Eastern Canada [J]. *Agronomy Journal*, 2008, 100(2): 271–276.
- 32 Olesen J E, Berntsen J, Hansen E M, et al. Crop nitrogen demand and canopy area expansion in winter wheat during vegetative growth [J]. *European Journal of Agronomy*, 2002, 16(4): 279–294.
- 33 徐明岗,孙小凤,邹长明,等. 稻田控释氮肥的施用效果与合理施用技术[J]. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11(4): 487–493.
Xu Minggang, Sun Xiaofeng, Zou Changming, et al. Effects and rational application of controlled-release nitrogen fertilizer in paddy field of southern China [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2005, 11(4): 487–493. (in Chinese)
- 34 苏琳,董志新,邵国庆,等. 控释尿素施用方式及用量对夏玉米氮肥效率和产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(4): 915–920.
Su Lin, Dong Zhixin, Shao Guoqing, et al. Effects of different application modes and rates of controlled release urea on fertilizer nitrogen use efficiency and grain yield of summer maize [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(4): 915–920. (in Chinese)
- 35 彭玉,孙永健,蒋明金,等. 不同水分条件下缓/控释氮肥对水稻干物质质量和氮素吸收、运转及分配的影响[J]. *作物学报*, 2014, 40(5): 859–870.
Peng Yu, Sun Yongjian, Jiang Mingjin, et al. Effects of water management and slow/controlled release nitrogen fertilizer on biomass and nitrogen accumulation, translocation, and distribution in rice [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40(5): 859–870. (in Chinese)