基于 DNDC 模型与二分法的滨海盐渍土水稻最佳施氮量研究

李 强，李建国，张忠启，茆 彭

（江苏师范大学 地理测绘与城乡规划学院，江苏 徐州 221116）

摘 要：[目的] 探讨滨海盐渍土水稻田的最佳施氮量，为研究区科学施氮提供一定决策依据。[方法] 基于 DNDC 模型与数学二分法，模拟水稻在加施 10%，20%，30%和减施 10%，20%，30%等 6 种施氮条件下产量变化特征，划定最佳施氮量所在区间，并对最佳施肥量下的环境效益进行评价。[结果] ①在减施 10%，20%，30%和增施 10%，20%，30%氮肥时，水稻产量依次为 6 431.67，5 939.22，5 439.66 kg/hm^2 和 7 686.51，7 739.94，7 739.94 kg/hm^2；②最佳施氮区间在增施 10%～20%，即施氮区间为 519.0～566.18 kg/hm^2。经二分法测算，该地最佳施氮量为 528.214 kg/hm^2；③采用该最佳施氮量时，水稻种植期间总氮氧化合物排放量为 9.24 kg/hm^2，具有良好环境效益。[结论] 水稻全生长期内施用 528.214 kg/hm^2 的氮肥，滨海盐渍土水稻田产量达到最大值，兼具良好环境效益。

关键词：施氮量；水稻产量；环境效益；DNDC 模型；二分法

文献标识码：B **文章编号**：1000-288X(2018)03-0167-07 **中图分类号**：S147.22

文献参数：李强，李建国，张忠启，等. 基于 DNDC 模型与二分法的滨海盐渍土水稻最佳施氮量研究[J]. 水土保持通报，2018，38(3)：167-173. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.20180426.001. Li Qiang，Li Jianguo，Zhang Zhongqi，et al. Optimizing N-fertilizer inputs for rice production in coastal saline based on a biogeochemical model and dichotomy[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2018，38(3)：167-173.

Optimizing N-Fertilizer Inputs for Rice Production in Coastal Saline Based on a Biogeochemical Model and Dichotomy

LI Qiang，LI Jianguo，ZHANG Zhongqi，MAO Peng

（*School of Geography，Geomatics，and Planning，Jiangsu Normal University，Xuzhou，Jiangsu* 221116，*China*）

Abstract：[Objective] Determing the optimal amount of N-fertilizer inputs for rice production is significant to improve the agricultural management in the coastal saline reclamation area，Eastern China. [Methods] Combining denitrification decomposition model(DNDC) and dichotomy method，this study simulated rice yield dynamics during the whole life cycle under six fertilization situations (10%，20%，30%，−10%，−20% and −30% of additional N-fertilizer inputs). And the optimal interval of N-fertilizer inputs and corresponding ecological impacts were explored. [Results] ① The rice yield in the study area was 6 431.67，5 939.22，5 439.66，7 686.51，7 739.94 and 7 739.94 kg/hm^2 10%，20%，30%，−10%，−20% and −30% N-fertilizer inputs，respectively. ② The optimal interval of fertilization was from 10% to 20% of additional fertilizer inputs，namely，519.0 ～ 566.18 kg/hm^2 of N-fertilizer inputs. And the optimal N-fertilizer inputs was 528.214 kg/hm^2，according to dichotomy analysis. ③ Based on the optimal amount of N-fertilizer inputs，the nitrogen oxide emission was 9.24 kg/hm^2 during full rice growth period，which showed a good environmental benefit. [Conclusion] The optimal amount of N-fertilizer inputs during rice production in the

收稿日期：2017-10-06 **修回日期**：2017-12-29

资助项目：国家自然科学基金项目“滨海地区盐渍土改良对土壤有机碳固持的影响机理”(41701371)，“采样点布置和空间预测对揭示红壤区土壤有机碳变异性的影响”(41201213)；教育部人文社会科学研究一般项目(17YJCZH085)；江苏省研究生科研创新计划(KYCX17_1686)

第一作者：李强(1994—)，男(汉族)，江苏省徐州市人，硕士研究生，主要研究方向为沿海滩涂盐渍土开发及其生态环境效应。E-mail：liqiang201609236@163.com。

通讯作者：李建国(1986—)，男(汉族)，江苏省泗阳县人，博士，讲师，主要研究沿海滩涂开发及其生态环境效应。E-mail：lijianguo531@126.com。

study area is 528.214 kg/hm^2. This optimal N-fertilizer inputs, can improve the rice yields of saline soil to the top level and produce a better environmental benefit.

Keywords: nitrogen application amount; rice yield; environmental benefit; DNDC model; dichotomy

农业耕作是江苏东部滩涂围垦地区较常见的开发方式[1],但围垦区土壤含盐量大、地下水矿化度高,极大抑制盐渍土地区作物产量提升,水稻产量相较省内其他地区明显偏低。据相关研究,滨海地区水稻产量较省内平均水平低约 11.86%,较周边城市如淮安约低 7.98%[2]。江苏滨海围垦区是中国主要的沿海农业开发地区,提升这一地区粮食产量与保护生态环境是保障区域粮食安全、提升农村发展能力的主要举措[3-4]。从中国各地区众多田间试验表明,通过调整肥料用量可大幅提高水稻产量[5-7]。适当增施氮肥能促进植物营养生长,促进叶绿素形成。敖和军等[5]学者于湖南等地的研究表明,当施氮肥水平由 135 kg/hm^2 提升至 225 kg/hm^2 时,水稻产量显著提升;黎忠祥等[6]学者于云南省陆良县的研究表明,增施氮肥对水稻产量有明显增产作用,并给出最高及最佳经济产量的施氮量;而宋宪青[7]的研究表明,除栽植密度对水稻产量有影响外,增施氮肥也能使水稻增产。然而,过多施用氮肥会增加硝酸盐淋溶和反硝化作用,引起温室气体排放、水体与土壤污染与劣变等环境问题。面对中国氮肥施用量大、施氮利用率低的现状[8-9],在保证粮食产量稳定增长的同时兼顾环境效益,对进一步规范水稻施氮量具有重要指导意义。

施氮量对作物产量的影响除从微观田间试验角度研究外,还可从宏观模型模拟层面展开[10]。所谓模型模拟,即使用诸如 DNDC,Century,Biome-BGC,RothC 和 NCSOIL 等生物地球化学过程模型,模拟与目标区一致的气候、土壤环境,进行不同施氮措施下对作物产量定量化模拟。国内已有诸多学者使用模型方法进行农田生产力和环境效益的相关研究。高春雨[9]在施肥管理方面进行了县域农田作物产量和温室气体排量的模拟与估算;邱建军等[10]学者使用模型方法进行了土壤肥力对作物产量影响的研究;高懋芳[11]使用 DNDC 模型对小清河施肥条件下农业氮素排放对作物产量和面源污染的影响进行了模拟研究。相比田间试验,使用模型模拟研究施氮对生产力的影响具有方便快捷、高效率、高精度的特点。将野外调研与模型模拟相结合可以在很大程度上节约成本并提高精度。二分法是一种无约束一维搜索优化逼近算法,将其与模型模拟相结合可以快速确定最优模型参数,进一步提高模型模拟精度。将 DNDC 模型和数学二分法结合,测算滨海盐渍土水稻田最佳施氮量,探究不同施氮条件下的环境效益。指导中国滨海地区农业科学管理,促进滩涂生态环境保护。

1 材料与方法

1.1 试验田概况

试验田位于江苏省南通市如东县四桥村(北纬 32°22′16″,东经 121°22′27″),气候为亚热带海洋性季风气候,年平均气温 15 ℃,平均降雨量 1 042 mm。如东县境内地势平坦,从西南略向东南倾斜,西北部高程约 4.5 m,东南部高程约 3.2 m。该地土壤类型为典型滨海盐渍土,土壤有机质(SOC)含量为 9.3 g/kg,较省内平均水平显著偏低。土壤盐分组成主要为氯化钠,含量为 1.0 g/kg,土壤理化性质如表 1 所示。

表 1 试验田土壤理化性质

属性	有机质/(g·kg^{-1})	总氮/(g·kg^{-1})	总磷/(g·kg^{-1})	pH 值	容重/(kg·m^{-3})	盐分/(g·kg^{-1})	速效磷/(mg·kg^{-1})	速效钾/(mg·kg^{-1})
参数	9.3	0.92	0.66	7.8	1.78	1.0	6	155

1.2 试验设计与处理

田间试验于 2016 年 6—10 月末在该地进行,种植水稻品种为宁稻 13,平均行距 23.2 cm,平均株距 18.0 cm。水稻种植期间田间管理共灌水 4 次、施氮肥 4 次。施用磷肥 143.56 kg/hm^2 作为底肥,施用氮肥为总氮大于 46.4%,粒度范围为 0.85～2.80 mm 的尿素,氮肥总投入量为 471.82 kg/hm^2,施氮肥时间、种类和用量详见表 2。

水稻收割前一星期进行测产,依五点法在田内均匀布置测产点 5 个,各点使用1 m^{2}测产框将水稻其连根挖出作为一组样品,并量出该点的 11 行行距和 11 株株距,5 个测产点的行距与株距取平均,得出平均行距与平均株距,测算田中水稻总棵数[12]。经计算,试验田水稻产量为 7 050.75 kg/hm^2。

除施肥管理数据和水稻田产量数据外,进行 DNDC 模型模拟试验还需气候数据、土壤数据和作物数据。气象数据来自南通市如东县气象站点。土壤参数包括土壤质地、容重、pH 值、田间持水量等,为田间实测数据(见表 3)。如东县土壤类型为滨海堆积平原沙壤盐土,对应模型中黏粒比 0.06 的 Loamy

Sand 土壤质地值;土壤容重使用环刀法进行测定,在水稻种植前测定耕作层容重,测量值为 1.78 g/cm^3;土壤酸碱度使用电位测定法测定,测量值为 7.8;田间持水量使用铁框法进行测定,测定土壤自然含水量、饱和含水量和灌溉深度,计算田间持水量为 27%;土壤萎蔫点在水稻收割前测得,作物萎蔫时土壤中尚存留的水分含量为 13%;土表初始有机碳含量在水稻种植前采样,使用碳氮仪测得[13],值为 0.009 3 kg/kg。作物数据使用模型定义的水稻数据(见表 4),包括最大生物量、生物量比、生物量碳氮比、生长积温等参数。

表 2　水稻生育期灌溉与施氮措施

灌水次数	时间	灌水量/mm	施氮次数	时间	施氮量/(kg·hm^{-2})
1	20160605	20	1	20160602	68.25
2	20160705	25	2	20160709	94.96
3	20160805	40	3	20160722	148.37
4	20160915	20	4	20160817	160.24

注:7 月 25 日至 8 月 5 日,10 月 15 日至 10 月 31 日为烤田;化肥种类为尿素。

表 3　DWDC 模型模拟所需土壤参数

参 数	参数值
土壤质地	0.06
容 重	1.78
土壤酸碱度	7.80
田间持水量	0.27
萎蔫点	0.13
土表有机碳含量/%	0.93

表 4　DWDC 模型模拟所需水稻参数

参 数	参数值
最大生物量(果/叶/茎/根)/(kg·hm^{-2})	14 000/2 860/2 860/2 080
生物量比(果/叶/茎/根)	0.4/0.22/0.22/0.16
生物量碳氮比(果/叶/茎/根)	45/85/85/85
年需氮量/(kg·hm^{-2})	207.32
到成熟期所需积温	3 800
需水量/g	508
固氮系数	1.2
生长最佳温度/℃	25

注:需水量为每 1 g 水稻所需的水量。

1.3　数据处理与分析

DNDC(denitrification-decomposition "脱氮—分解")模型,是目前国际上最成功的生物地球化学模型之一,可用于模拟各个国家和地区农业生态系统中碳、氮以及生物量动态变化的生物地球化学循环[14-16]。2000 年结束的亚太地区全球变化国际研讨会上,DNDC 模型被指定为在亚太地区进行推广的首选生物地球化学模型[17]。试验以试验田 2016 年水稻施氮量为基准(471.82 kg/hm^2),在此基准上依次加施 10%,加施 20%,加施 30%,减施 10%,减施 20%,减施 30%和不施氮等共 7 种不同施氮管理方式作为模型试验的对比试验,每组试验输入的施氮量如表 5 示。将各组试验按照施氮量由小到大的顺序输入模型,当施氮达到一定数量时,模拟的水稻产量将不再增加(即已达到最大生物量),则划定最大生物量所落在的施氮数量区间为[a,b]。将施氮数量区间[a,b]采用二分法取中值,将中值($a+b$)/2 带入模型再次模拟,若得出产量结果仍为最大生物产量,则最佳施氮量区间落于[a, ($a+b$)/2],将区间再次细分;若得出产量结果不为最大生物产量,则最佳施氮量区间落于[($a+b$)/2, b],将区间再次细分。设区间[a,b]精度满足 $e=b-a<0.001$ 时,结束循环,($a+b$)/2 即为最佳施氮量,试验设计流程如图 1 所示。

表 5　不同方式施氮措施　　kg/hm^2

措 施	不同时间施氮量				合计
	20160602	20160709	2 0160722	20160817	
基 准	68.25	94.96	148.37	160.24	471.82
不施氮	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
加施 10%	75.07	104.45	163.21	176.27	519.00
加施 20%	81.90	113.95	178.05	192.29	566.18
加施 30%	88.72	123.44	192.88	208.31	613.37
减施 10%	61.42	85.46	133.54	144.22	424.64
减施 20%	54.60	75.97	118.70	128.19	377.46
减施 30%	47.77	66.47	103.86	112.17	330.27

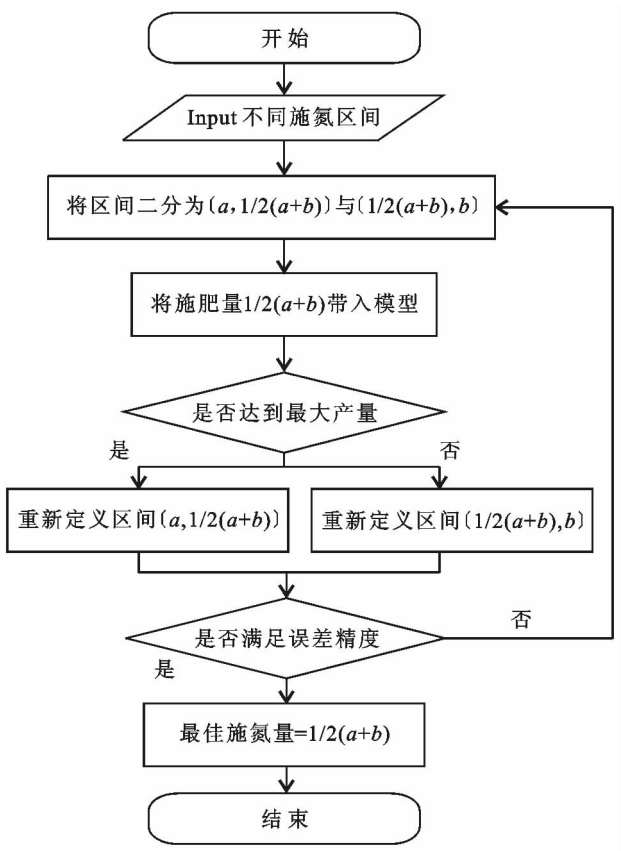


图 1　试验设计流程

2 结果与分析

2.1 不同施氮量下水稻生物量的变化

不同施氮量下水稻产量如图 2 所示。在水稻最大生物量达到之前，水稻总生物量与施氮量呈显著正相关，施氮肥量越大，总生物量越大。减施 10%，20%，30%和增施 10%，20%，30%氮肥时，水稻总生物量依次为 14 069.97，13 577.52，13 077.96 kg/hm^2 和15 324.81，15 378.24，15 378.24 kg/hm^2；相对基准值 14 689.05 kg/hm^2，总生物量依次减少 4.22%，7.57%，10.97%，增加 4.33%，4.69%，4.69%。相比不施氮的条件下，增施氮肥最高可使水稻增产 37.59%。当加施 20%氮肥时，水稻田产量达到最大值 7 739.94 kg/hm^2，再增施氮肥产量将不再变化。故根据模型模拟结果，在滨海围垦区的地理环境下，水稻的最大产量为 7 739.94 kg/hm^2。氮肥施用量与水稻产量趋势线可表示为：

$$Y=4\ 143.1\ln X-18\ 560 \quad (R^2=0.956\ 5)$$

式中：Y——水稻产量(kg/hm^2)；X——氮肥施用量(kg/hm^2)。在未达到最大产量前，平均每增施 1 kg/hm^2 氮肥，水稻产量可增加 27.07 kg/hm^2。

2.2 最佳施氮量的测算

由图 3 得，当水稻产量达到最大值时，对应的试验方法位于增施 10%氮肥和增施 20%氮肥之间，对应施氮量为 519.0～566.18 kg/hm^2，故最佳施氮量应位于此区间内。使用二分法结合 DNDC 模型对该区间进一步细分。如表 6 所示，测算最佳施氮量的算法共运行 16 次，当给定误差 $e<0.001$ 时结束循环。第 1 次循环，区间中值为 542.59 kg/hm^2，将中值带入模型，得产量 7 739.94 kg/hm^2，为最大产量，误差 e 不满足要求，区间取下限，即[519.0，542.59]，进入下一循环；第 2 次循环，区间中值为 530.795 kg/hm^2，带入模型得产量 7 739.94 kg/hm^2，为最大产量，误差 e 不满足要求，区间取下限，即[519.0，530.795]，进入下一循环；以此类推，当循环至第 16 次时，区间中值 528.214 kg/hm^2，带入模型得产量 7 739.940 kg/hm^2，是最大产量，误差满足要求($e=0.000\ 7<0.001$)，退出循环。即当施加氮肥量为 528.214 kg/hm^2 时，滨海盐渍土水稻田产量最大，528.214 kg/hm^2 为该地区的最佳施氮量。

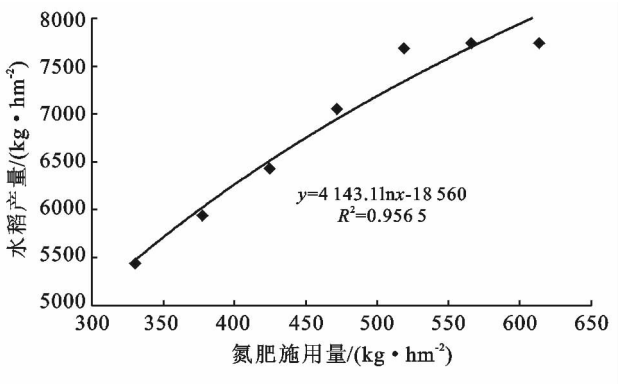


图 2 氮肥施用量与水稻产量关系

表 6 二分法求最佳施氮量

循环次数	区间下限	区间上限	中值/(kg·hm^{-2})	误差 e	产量/(kg·hm^{-2})	是否为最大产量	区间选择	是否退出循环
1	519.000	566.180	542.590	23.590	7 739.940	是	取下	否
2	519.000	542.590	530.795	11.795	7 739.940	是	取下	否
3	519.000	530.795	524.898	5.898	7 723.680	否	取上	否
4	524.898	530.795	527.846	2.949	7 738.080	否	取上	否
5	527.846	530.795	529.321	1.474	7 739.940	是	取下	否
6	527.846	529.321	528.583	0.737	7 739.940	是	取下	否
7	527.846	528.583	528.215	0.369	7 739.940	是	取下	否
8	527.846	528.215	528.031	0.184	7 739.220	否	取上	否
9	528.031	528.215	528.123	0.092	7 739.490	否	取上	否
10	528.123	528.215	528.169	0.046	7 739.760	否	取上	否
11	528.169	528.215	528.192	0.023	7 739.850	否	取上	否
12	528.192	528.215	528.203	0.012	7 739.850	否	取上	否
13	528.203	528.215	528.209	0.006	7 739.910	否	取上	否
14	528.209	528.215	528.212	0.003	7 739.910	否	取上	否
15	528.212	528.215	528.213	0.001	7 739.910	否	取上	否
16	528.213 4	528.215	528.214	0.000 7	7 739.940	是	取下	是

2.3 最佳施氮量环境效益

DNDC 模型在模拟施氮条件下水稻产量的同时，通过土壤氧气或其他氧化物含量，根据能斯特公式(Nernst equation)[18]计算土壤的总体氧化还原电位

(Eh)将土壤分为好氧与厌氧两部分,根据米邵公式(Michaelis-Menten equation)[19]计算硝化和反硝化反应速率,从而计算田间氮氧化合物排放量。如图 3 所示,随施氮量不断增加,水稻产量和种植期间总氮氧化合物排放量都呈上升趋势。在减施 10%,20%,30%和增施 10%,20%,30%氮肥时,水稻产量依次为 6 431.67,5 939.22,5 439.66 kg/hm^2 和 7 686.51,7 739.94,7 739.94 kg/hm^2,相对的氮氧化合物排放量分别为 8.28,7.38,6.47 kg/hm^2 和 9.16,9.75,10.44 kg/hm^2。当处于最佳施氮量之后,水稻产量增加到最大生物产量,并不再增加。与水稻产量不同,氮氧化合物排放量一直随施加氮肥量增加而增加,在不施氮肥状况下水稻种植期间共累计排放氮氧化合物 0.49 kg/hm^2;在基准施氮状况下(471.82 kg/hm^2)共排放氮氧化合物 8.88 kg/hm^2;在最佳施氮量下(528.214 kg/hm^2)共排放氮氧化合物 9.24 kg/hm^2;当处于加施 30%过量施氮状态下(613.37 kg/hm^2),即便水稻产量 7 739.940 kg/hm^2 不再增产,但作物未吸收利用的肥料留在土壤里,仍释放温室气体,氮氧化合物排放量(10.44 kg/hm^2)仍在持续增加。

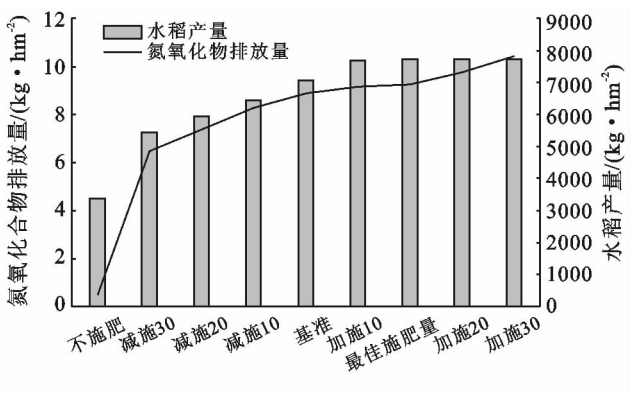


图 3　不同施氮量下氮氧化合物排放量与水稻产量

可见,过量施氮并不会使水稻产量进一步增加,而且会造成氮肥利用率降低,导致氮氧化合物排放量的增加,进而放大温室效应。据 IPCC 2013 年有关农业碳排放会议指出,N_2O 对温室效应贡献程度,是相同质量 CO_2 的 298 倍[20]。使用最佳施氮量对滨海水稻田进行施氮管理,不仅可以使作物产量最大化,还能减少氮氧化合物的排放,具有良好环境效益。在实际农业管理中,在采用最佳施氮量外,科学使用缓释肥料、硝化抑制剂能更好达到减少农业面源污染的效果[21]。

3　讨 论

3.1　DNDC 模型水稻产量模拟在滨海垦区的适用性

模拟结果的精度是衡量模型适用性的重要指标。与试验田实测产量 7 214.49 kg/hm^2 相比,DNDC 模拟的基准产量 7 050.75 kg/hm^2 与实测值实际误差为 163.74 kg/hm^2,为实测值的 2.27%,误差小于 10%,表明使用 DNDC 模型于滨海盐渍土地区水稻产量模拟精度较高,模型在滨海垦区产量模拟上适用性良好。DNDC 模型也能正确模拟滨海垦区不同施氮量下水稻生物量累积的过程。如图 4 所示,纵观不同施氮量对生长期间水稻生物量的变化,水稻总生物量约在 70 d 后(即对应水稻灌浆成熟期)增长速度发生变异。在 70 d 前,对应水稻拔苗期、分蘖期、有穗分化期、抽穗扬花期,无论采用哪种施氮方法,水稻总生物量的变化趋势较为一致。而在水稻灌浆期,水稻总生物量增加速率随施氮量的增大而增大。该种总生物量变化的特点,反映出施用氮肥量增加与水稻果实生物量累积具有较高相关性,相关系数为 0.904($p<0.05$)。而水稻其他部分(根、茎、叶)生物量标准差为 0,即不论施氮量是否变化,根、茎、叶的生物量不变,是因为氮肥在水稻生长过程中能够减少无效分蘖,提高有效成穗率,促进灌浆期茎鞘干物质向籽粒转移,从而增施氮肥更能促进水稻果实产量增加[22],而对水稻其他部分生物量的累积影响较小。

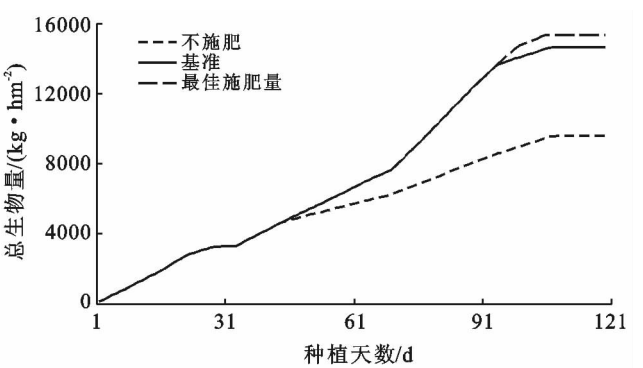


图 4　不同施氮量下水稻总生物量随时间变化

3.2　应用二分法确定最佳施氮量的意义

二分法定义最佳施氮量有着简单、便捷、易于理解的优点,且二分法总是收敛,结合田间数据和模型试验,能快速确定在特定管理方法下的最佳施氮量。二分法每进行一次查找即可筛选掉 1/2 的数据量,较遍历算法提升 1/2 的执行效率。滨海地区水稻最佳施氮量的测算试验是空间尺度、时间尺度较小的试验,将二分法应用于该试验,能够快速得出运算结果,具有较高的适用性和良好执行效率。但使用二分法的缺点也显而易见。当将研究的空间尺度和时间尺度继续扩大,如测算全省、全国乃至全世界各地区的最佳施氮量,海量地理空间数据、气候数据、土壤数据

和种植管理数据成倍增加，使用二分法进行模拟试验就难免显得捉襟见肘。若将DNDC模型与二分法结合的方法测算最佳施氮量应用于更大尺度的研究，在结合GIS系统数据管理的同时，需将二分法进一步优化，提升算法收敛速率。

3.3 最佳施肥量确定方法探讨

微观联系是科学研究的需要，宏观综合是政府决策与管理的目标。不同氮肥施用量下滨海盐渍土粮食产量的测定，田间试验、模型模拟都可以实现，并且各自有各自的优点和缺点。田间试验根据试验目标进行试验设计，试验尤其是长期观测试验最能直接反映试验区土壤、作物生长状况。但田间试验具有先验约束带来先天性缺陷。而且，要投入大量人力、物力、财力进行。试验周期长、劳动量大且带有不可重复性。使用田间试验进行最佳施氮量的决策，田间试验结果给出的最佳施氮量往往是一个区间，而不是一个具体数值，实践指导作用受限。纵观已有的田间试验测算最佳施氮量的研究，如表7所示，敖和军等[5]给出的氮肥区间跨度为90 kg/hm^2，黎忠祥等[6]为239.7 kg/hm^2，宋宪青[7]为23.5 kg/hm^2。大跨度的施氮区间，导致试验结果精确度差，给最佳施氮量的决策仍带来一定的困难。

而模型模拟是依靠生物地球化学过程模型进行模拟试验。根据研究区气候、土壤、作物和田间管理方式，模拟作物在具有局地特点的生物地球化学场下的生长过程，具有数据易获取、模拟结果精度高、省时高效、试验可重复等优点。从本文研究内容看，结合数学二分法研究区域最佳施氮量，可将最佳施氮区间收敛为一个具体数值，相较田间试验得出的最佳施氮区间有更高的精度。纵观已有使用模型试验来确定最佳施氮量的研究如表7所示，在华北平原进行的模型试验，小麦和玉米最佳施氮量为128和340 kg/hm^2[23-24]，模型试验结果多为一个具体数值，不是一个施氮区间。

综上所述，田间试验和模型试验具有彼此不可替代的优势。在土肥研究工作中，将田间试验和模型试验结合，充分发挥田间试验和模型试验各自优点。农业部2017年8月印发的《种养结合循环农业示范工程建设规划(2017—2020年)》[25]，明确指出我国东部农业发展存在污染风险高、区域内协调资源环境保护压力大、面源污染严重等问题。提出确保水土质量安全的前提下，科学发展种植业的项目建设。本研究利用田间试验和模型二分法进行制定江苏垦区兼顾粮食产量和环境效益的精确施氮量，对指导农业精确管理、防治农业氮素污染起到巨大作用。

表7 最佳施氮量研究现状

编号	研究区	研究作物	研究方法	最佳施氮量/(kg·hm^{-2})	资料来源
1	湖南省	水稻	田间试验	135～225	敖和军等[5]
2	云南陆良县	水稻	田间试验	90.15～329.85	黎忠祥等[6]
3	黑龙江明水县	水稻	田间试验	94.0～117.5	宋宪青[7]
4	华北平原	小麦	模型试验	128	夏文建等[23]
5	华北平原	玉米	模型试验	340	李虎[24]
6	江苏滨海垦区	水稻	模型试验	528.214	本研究

4 结论

(1) DNDC模型模拟滨海盐渍土水稻产量7 050.75 kg/hm^{2}与田间测产值7 214.49 kg/hm^{2}实际误差为163.74，在误差的10%以内，表明使用DNDC模型于滨海盐渍土地区水稻产量模拟精度较好。在减施10%，20%，30%和增施10%，20%，30%氮肥时，水稻产量依次为6 431.67，5 939.22，5 439.66 kg/hm^{2}和7 686.51，7 739.94，7 739.94 kg/hm^2；总氮氧化合物排放量分别为8.28，7.38，6.47 kg/hm^{2}和9.16，9.75，10.44 kg/hm^2。不同施氮肥数量下，加施氮肥可适当使滨海水稻田水稻产量提升，但当产量达到最大产量后，产量不再增加，而氮氧化合物随施氮肥量的增加持续增加。

(2) 滨海盐渍土水稻最佳施氮区间在增施10%～20%，即施氮区间为519.0～566.18 kg/hm^2，最佳施氮量为528.214 kg/hm^2；在采用最佳施氮时水稻生育期总氮氧化合物排放量为9.24 kg/hm^2，具有良好环境效益。

(3) 二分法与DNDC模型相结合可以更为快速精确的确定滨海最佳施氮量，提高模型利用的效率。

[参 考 文 献]

[1] 李建国，濮励杰，徐彩瑶，等. 1977—2014年江苏中部滨海湿地演化与围垦空间演变趋势[J]. 地理学报，2015，70(1)：17-28.

[2] 杜永林，张巫军，吴晓然，等. 江苏省水稻产量时空变化特征[J]. 南京农业大学学报，2014，37(5)：7-12.

[3] Sun Zhigao, Sun Wenguang, Tong Chuan, et al. China's coastal wetlands: Conservation history, implementation efforts, existing issues and strategies for future improvement [J]. Environment International, 2015(79):25-41.

[4] 李建国，濮励杰，朱明，等. 土壤盐渍化研究现状及未来研究热点[J]. 地理学报，2012，67(9)：1233-1245.

[5] 敖和军，王淑红，邹应斌，等. 不同施肥水平下超级杂交稻对氮、磷、钾的吸收累积[J]. 中国农业科学，2008，41(10)：3123-3132.

[6] 黎忠祥，栾国强，许石昆，等. 不同氮磷钾用量对水稻产量的效应研究[J]. 中国稻米，2009，(2)：27-29.

[7] 宋宪青.不同施肥量及栽培密度对水稻产量和效益的影响[J].现代农业科技,2011(2):52-52.
[8] 逯非,王效科,韩冰,等.中国农田施用化学氮肥的固碳潜力及其有效性评价[J].应用生态学报,2008,19(10):2239-2250.
[9] 高春雨.县域农田 N_2O 排放量估算及其减排碳贸易案例研究[D].北京:中国农业科学院,2011.
[10] 邱建军,王立刚,李虎,等.农田土壤有机碳含量对作物产量影响的模拟研究[J].中国农业科学,2009,42(1):154-161.
[11] 高懋芳.小清河流域农业面源氮素污染模拟研究[D].北京:中国农业科学院,2011.
[12] 何瑞银,罗汉亚,李玉同,等.水稻不同种植方式的比较试验与评价[J].农业工程学报,2008,24(1):167-171.
[13] 王巧环,任玉芬,孟龄,等.元素分析仪同时测定土壤中全氮和有机碳[J].分析试验室,2013,32(10):41-45.
[14] Li Changsheng. Modeling nitrate leaching with a biogeochemical model modified based on observations in a row-crop field in Iowa[J]. Ecological Modelling, 2006, 196(1/2):116-130.
[15] 喻朝庆,李长生,张峰,等.大尺度农业因旱减产动态预报及不同空间尺度的灾情重现期变化评估:以辽宁省为例[C].北京:中国气象学会年会,2014:1-17.
[16] Guo Miao. The environmental profile of bioethanol produced from current and potential future poplar feedstocks in the EU. [J]. Green Chemistry, 2014, 16(11):4680-4695.
[17] 陈海心,孙本华,冯浩,等.应用 DNDC 模型模拟关中地区农田长期施肥条件下土壤碳含量及作物产量[J].农业环境科学学报,2014,33(9):1782-1790.
[18] Vidaliglesias F J, Sollagullón J, Rodes A, et al. Understanding the nernst equation and other electrochemical concepts: An easy experimental approach for students[J]. Journal of Chemical Education, 2012, 89(7):936-939.
[19] English Brian P, Min Wei, van Oijen Antoine M, et al. Ever-fluctuating single enzyme molecules: Michaelis-Menten equation revisited [J]. Nature Chemical Biology, 2006, 2(2):87-94.
[20] Church J A, Clark P, Cazenave A, et al. Climate change 2013: The physical science basis contribution of working group Ⅰ to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[J]. Computational Geometry, 2013, 18(2):95-123.
[21] Weiske, A. Mitigation of greenhouse gas emissions in European conventional and organic dairy farming[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2006, 112(2/3):221-232.
[22] 徐艳玲.氮肥对水稻生长的影响[J].现代农业科技,2014(19):27-27.
[23] 夏文建,周卫,梁国庆,等.稻麦轮作农田氮素循环的 DNDC 模型分析[J].植物营养与肥料学报,2012,18(1):77-88.
[24] 李虎,王立刚,邱建军.基于 DNDC 模型的华北典型农田氮素损失分析及综合调控途径[J].中国生态农业学报,2012,20(4):414-421.
[25] 中华人民共和国农业部.种养结合循环农业示范工程建设规划(2017-2020)[EB/OL].(2017-08-15).http://www.moa.gov.cn/zwllm/ghjh/201708/t20170815_5785251.htm.

(上接第 166 页)

[11] 景国勋,施式亮.系统安全评价与预测[M].徐州:中国矿业大学出版社,2009.
[12] Opricovic S, Gwo-Hshiung T. Cornpromise solution by MCDM methods:A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS [J]. European Journal of Operational Research, 2004,156(2):445-455.
[13] 来水利,柴强,王宾.新型运输用煤炭抑尘剂的制备与性能[J].精细石油化工,2012,29(1)56-59.
[14] 王永慧,贾志超,蒋林天.甘蔗渣抑尘剂的微波聚合制备及性能表征[J].环境工程学报,2017,11(7):4202-4209.
[15] 韩明迪.氧化淀粉接枝丙烯酸丙烯酰胺抑尘剂的合成与应用研究[D].北京:北京化工大学,2009.
[16] 霍磊霞,煤尘抑制剂的制备与性能研究[D].太原:山西大学,2009.
[17] 梁新景. VAC-MMA-BA 三元共聚物固沙抑尘剂的合成与应用研究[D].北京:北京化工大学,2010.
[18] 尹静.降解型抑尘剂的研究[D].天津:天津理工大学,2013.
[19] 王新会.煤尘抑尘剂的研究[D]. 呼和浩特:内蒙古工业大学,2010.
[20] 曹晓锋.固尘抑尘剂的研制[D].呼和浩特:内蒙古工业大学,2009.
[21] 柴强.微波辐射下丙烯酸类和抑尘剂的合成及应用研究[D].西安:陕西科技大学,2012.