

沿海滩涂围垦区土地生产潜力模型构建与应用 ——以江苏省如东县为例

许艳¹, 濮励杰^{1,2*}, 于雪¹, 朱明¹, 蔡芳芳¹

(1. 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023; 2. 国土资源部海岸带开发与保护重点实验室, 南京 210023)

摘要:沿海淤泥质滩涂是中国重要的耕地后备资源之一, 滩涂围垦新增的大量耕地资源的生产潜力能反映滩涂土壤粮食安全保障能力大小。本文以江苏省如东县滩涂围垦区为例, 在现有的光温水气候生产潜力模型的基础上, 引进基础地力贡献率和盐分限制因子作为土壤有效性系数, 构建沿海地区土地生产潜力模型, 并通过水稻和小麦产量对模型结果进行初步验证。研究表明: 该模型具有一定可行性。滩涂围垦区水稻产量土壤基础地力贡献率为55%~59%; 小麦基础地力贡献率为50%~80%。未脱盐的1982年滩涂围垦区水稻和小麦产量受到盐分阻碍的系数分别为0.73和1.00。2007年垦区由于盐分太高不能种植水稻, 小麦产量受到盐分阻碍系数为0.35。未脱盐的1982年滩涂垦区土壤基础地力修正后的水稻和小麦土地生产潜力分别为12235.84和6502.23 kg/hm²; 土壤盐分修正后的土地生产潜力分别为15677.42和10329.39 kg/hm²; 土壤基础地力和盐分共同修正后的土地水稻和小麦生产潜力分别为8934.97和6502.23 kg/hm²。与实地调查的水稻产量(9750 kg/hm²)和小麦生产潜力(6000 kg/hm²)相比, 目前土地生产力远小于盐分限制下的土地生产潜力, 与基础地力和盐分双重限制下的土地生产潜力接近, 改善土壤施肥技术可以进一步提高土地生产力。

关键词: 土地生产潜力; 基础地力贡献率; 盐分限制因子; 土壤有效性系数; 江苏沿海地区

1 引言

土地生产力的概念因土地税征收需要而起源于20世纪20年代的德国。中国学者50年代开始研究农作物生产与气候的关系(任美镔, 1950; 竺可桢, 1964), 考虑光、温、水、土等自然因子以及人类耕作、施肥、灌溉等农业管理技术, 根据作物能量转化过程来逐步估算农业生产潜力大小。在一定的自然地理背景下, 即光、温度、水分大致一定的情况下, 土地生产潜力存在阈值, 改变客观不利因素, 力争发挥最大生产潜力, 是生产力研究的重要目标(冷疏影, 1992)。

国内外与土地生产力相关的作物生长模型很多, 比如美国作物—环境资源综合系统(Crop-Envi-

ronment Resource Synthesis System, CERES), 荷兰的作物生长模型WOFOST(World Food Studies), 国内水稻生长日历模拟模型(Rice Growth Calendar Simulation Model, RICAM)等, 多侧重于从作物生理生态过程模拟。国内从资源利用角度出发的宏观土地生产力模型主要包括农用地分等定级和产能核算(郟文聚等, 2007)与ESLP模型(邓祥征等, 2009)等, 这些模型在区域尺度上系统性地光、温、水、土以及管理因子多层次开展参数本地化的应用研究, 但不同地区农业生产潜力的主要限制因素不尽相同, 包括无霜期(王志强等, 2009)、旱涝盐碱灾害(陈超等, 2009)等, 确定与农业生产过程相适应的各类有效系数无论在指标设定还是研究尺度方面均较粗略(郑海霞等, 2003)。目前测算土壤有效系

收稿日期: 2014-12; 修订日期: 2015-04。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41230751, 41101547, 40871255); 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CXLX12-0036); 南京大学优秀博士研究生创新能力提升计划项目(2014001B010)。

作者简介: 许艳(1986-), 女, 江苏滨海人, 博士研究生, 主要从事土地利用与评价研究, E-mail: xuyanxiaozz@126.com。

通讯作者: 濮励杰(1965-), 男, 江苏吴江人, 教授, 主要从事土地利用与规划等研究, E-mail: ljpu@nju.edu.cn。

引用格式: 许艳, 濮励杰, 于雪, 等. 2015. 沿海滩涂围垦区土地生产潜力模型构建与应用: 以江苏省如东县为例[J]. 地理科学进展, 34(7): 862-870. [Xu Y, Pu L J, Yu X, et al. 2015. Potential land productivity of the coastal reclamation zones of Rudong County, Jiangsu Province [J]. Progress in Geography, 34(7): 862-870.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2015.07.008

数依据的土壤基本理化性质是根据全国土壤因子评价标准进行打分加权平均而得到的,并未考虑土壤基本理化属性与农作物产量之间的关系,没有真正反映出作物实际生长过程中潜力变化过程。

沿海滩涂土壤是中国重要的耕地后备资源基地之一(周生路等, 2006; 王千等, 2011), 构建沿海滩涂围垦区土地生产潜力模型, 了解该地区土地生产潜力大小是沿海开发的重要基础性工作, 同时也关系到沿海地区的农业可持续发展, 对新增资源评价利用等相关研究具有一定参考价值。目前, 在沿海滩涂地区滩涂湿地的初级生产力已受到学术界的广泛关注(韩士群等, 2009; 蒋蕊竹等, 2011), 但对滩涂围垦区的土地生产潜力估算研究还比较薄弱。本文引入土壤基础地力贡献率和土壤盐分限制因子两个系数来表征土壤有效系数, 构建沿海滩涂围垦区土地生产潜力模型, 并对江苏省如东县沿海滩涂围垦区开展实证研究。

2 研究方法

土地生产潜力模型是在光合生产潜力模型的基础上, 开展温度订正(杨恒山等, 1999), 水分订正(张强等, 1995; 梁佳勇等, 2004), 以及土壤有效系数修正, 其模型为:

$$Y = Q \times f_1 \times f_2 \times f_3 \times f_4 = Y_1 \times f_2 \times f_3 \times f_4 = Y_2 \times f_3 \times f_4 = Y_3 \times f_4 \quad (1)$$

式中: Y 为土地生产潜力/(kg/hm²); Q 为太阳总辐射/(MJ/m²); f_1 为光合有效系数; Y_1 为光合生产潜力/(kg/hm²); f_2 为温度有效系数; Y_2 为光温生产潜力/(kg/hm²); f_3 为水分有效系数; Y_3 为气候生产潜力/(kg/hm²); f_4 为土壤有效系数, 系土壤基础地力贡献率与土壤盐分限制因子修正系数的乘积。

按照作物生长期的土地生产潜力模型如下:

$$Y = \sum Q \times f_1 \times f_{2i} \times f_{3i} \times f_4 \quad (2)$$

式中: Y 为土地生产潜力/(kg/hm²); Q_i 为第 i 生长阶段的太阳总辐射/(MJ/m²); f_1 为光合有效系数; f_{2i} 为第 i 个生长阶段的温度有效系数; f_{3i} 为第 i 个生长阶段的水分有效系数; f_4 为土壤有效系数。

2.1 农作物生长期的划分

不同时期农作物生长状况与农作物产量密切相关。联合国粮农组织(FAO)将作物生育期分为4个阶段分别为初始生长期、生长发育期、中期和末

期(尹海霞等, 2012)。本文将作物生长期分为5个阶段, 分别为苗期、营养生长期、营养生殖生长期、营养灌浆期和灌浆成熟期。在江苏省沿海地区, 水稻生长期为5月15日-10月23日, 水稻的生育期约150~155天, 包括秧苗期、有效分蘖期、无效分蘖期、拔节孕穗期、抽穗期、扬花期、灌浆期和成熟期。因此, 水稻的苗期为5月下旬-6月上旬, 营养生长期为6月下旬-7月上旬, 营养生殖生长期为7月下旬-8月上旬, 营养灌浆期为8月下旬-9月上旬, 灌浆成熟期为9月下旬-10月下旬。冬小麦生长期为10月23日-次年6月上旬, 生长期220~270天, 包括出苗、三叶、分蘖、越冬、返青、起身、拔节、孕穗、抽穗、开花、灌浆和成熟期。因此, 冬小麦的苗期为10月下旬, 营养生长期为11月上旬-次年2月下旬, 营养生殖生长期为3月上旬-4月上旬, 营养灌浆期为4月下旬-5月上旬, 灌浆成熟期为5月下旬-6月上旬。

2.2 光合有效系数

光合有效辐射的观测仪器甚少, 通常需要通过计算方法取值, 主要方法如式(3)-(4)表示。

$$Q_g = \varepsilon \times Q \quad (3)$$

$$Q_g = \varepsilon_1 \times Q_1 + \varepsilon_2 \times Q_2 \quad (4)$$

式中: Q_g 表示光合作用有效辐射/(MJ/m²); ε 、 ε_1 、 ε_2 分别表示不同的系数; Q 表示总辐射/(MJ/m²), Q_1 和 Q_2 分别表示直接辐射/(MJ/m²) 和间接辐射/(MJ/m²)。本文采用式(3)计算光合作用有效辐射。光合有效系数计算如式(5)所示:

$$f_1 = \Omega \varepsilon \varphi (1 - \alpha)(1 - \beta)(1 - \rho)(1 - \gamma)(1 - \omega) f(L)(1 - \eta)^{-1}(1 - \delta)^{-1} q^{-1} S \quad (5)$$

式中: f_1 表示光合有效系数; Ω 表示作物光照强度利用效率; ε 表示光合有效辐射占总辐射的比例; φ 为光量子转化的效率; α 表示植物群体反照率; β 表示植物繁茂群体透射率; ρ 是作物非光合器官截获辐射比例; γ 是超过光饱和点的光的比例; ω 表示呼吸消耗占光合产物的比例; $f(L)$ 是作物叶面积动态变化的订正值; η 是成熟作物的含水率; δ 表示作物灰分率; q 表示单位干物质的含热量/(MJ/kg); S 表示作物收获指数, 即干物质(籽粒、糖、油)所占总生物量的比例。本文采用的光合有效系数参数见表1(林文鹏等, 2000; 曹卫星, 2006; 杨重一等, 2010)。

2.3 温度有效系数

作物不同生长阶段中温度环境存在很大的差

表 1 光合有效系数参数取值

Tab.1 The values of photosynthetic parameters

参数	Ω	ε	φ	α	β	ρ	γ	ω	$f(L)$	η	δ	q	S
水稻	0.9	0.49	0.22	0.06	0.08	0.1	0.05	0.33	0.56	0.14	0.08	16.9	0.45
小麦	0.85	0.49	0.22	0.1	0.07	0.1	0.05	0.33	0.5	0.14	0.08	17.58	0.45

异,其决定着作物体内各种酶的活性。很多学者分别对 C₃ 和 C₄ 作物(林文鹏等, 2000; 梁佳勇等, 2004), 以及喜凉作物和喜温作物(曹卫星, 2006; 蔡承智等, 2007)采用不同的线性函数进行温度有效系数修正, 也有学者采用非线性函数进行修正(陈建文等, 1999)。由于作物生长对温度环境的变化适应能力的复杂性, 本文采用非线性温度修正方法(杨恒山等, 1999; 杨重一等, 2010), 如式(6)-(7)所示。

$$f_2 = \frac{(T - T_1)(T_2 - T)^B}{(T_0 - T_1)(T_2 - T_0)^B} \quad (6)$$

$$B = \frac{T_2 - T_0}{T_0 - T_1} \quad (7)$$

式中: f_2 为温度有效系数; T 为某一段时间的平均气温/°C; T_0 、 T_1 、 T_2 分别为该段时间作物产量形成的最适温度/°C、生长发育的下限温度/°C、上限温度/°C; B 为中间变量。采用的作物不同时期三基点温度见表 2。

2.4 水分有效系数

作物不同生长阶段其降雨量和蒸散量等差异较大, 同时作物自身对水分的需求量和缺水产生的影响也不同。水分有效系数计算公式如公式(8)。本文采用温度、相对湿度以及风速与蒸散量的函数关系进行估算蒸散量(曹卫星, 2006)。作物需水系数和作物缺水敏感系数与作物生育期有关(尹海霞, 2012)。各参数如表 3 所示(郑剑非, 1982)。

$$f_3 = \begin{cases} 1 - K_y \times \left(1 - \frac{P}{ET_m}\right), & P < ET_m \\ 1, & P \geq ET_m \end{cases} \quad (8)$$

式中: f_3 为水分有效系数; P 为作物生育期降水量/mm; ET_m 为作物需水量/mm; K_y 为作物缺水敏感系数。作物需水量可根据参考作物蒸散量计算得到:

$$ET_m = K_c \times ET_0 \quad (9)$$

式中: ET_m 为作物需水量/mm; K_c 为作物系数; ET_0 为参考作物蒸散量。

作物蒸散量(ET_0)计算公式(李春云等, 2001)如下:

表 2 作物各生长阶段三基点温度

Tab.2 Temperature of three key points at different growth stages of crops

生长阶段	水稻			小麦		
	T_0	T_1	T_2	T_0	T_1	T_2
苗期	21	9	28	18	5	27
营养生长期	25	12.5	32	24	7	30
营养生殖生长期	27.8	15	33	27	14	33
营养灌浆期	26.3	15	33	25	14	33
灌浆成熟期	19.3	10.5	30	18	10	30

注: 水稻和小麦温度参数参考文侯光良等(1985); 村田吉男研究表明, 小麦表观光合作用在 0~40°C, 最适温度为 18°C(引自尹钧等, 1992)。

表 3 作物各生长阶段需水系数和缺水敏感系数

Tab.3 Parameters of crop water requirement and sensitivity to water scarcity at different growth stages

生长阶段	作物需水系数 K_c		作物缺水敏感系数 K_y	
	水稻	小麦	水稻	小麦
苗期	1.10~1.15	0.30~0.40	0.22	0.20
营养生长期	1.10~1.50	0.70~0.80	0.32	0.60
营养生殖生长期	1.10~1.30	1.05~1.20	0.27	0.60
营养灌浆期	0.95~1.05	0.65~0.75	0.19	0.50
灌浆成熟期	0.95~1.05	0.20~0.25	0.15	0.00

注: 水稻作物缺水敏感系数参考文献(周利民等, 2002); 作物需水系数采用最高值。

$$ET_0 = 0.0003 \times (25 + T)^2 \times (100 - f) \times (3 + \mu) \quad (10)$$

式中: T 、 f 、 μ 分别为月平均气温/°C、相对湿度/%、风速/(m/s)。

2.5 土壤有效系数

作物生长发育离不开土壤养分供给。衡量土壤施肥对作物产量的贡献一般用基础地力贡献率表示, 其值为不施肥时的作物产量与适宜肥料施用下的产量之比, 与作物类型、气候和土壤特性等因素密切相关, 变幅在 20%~75%(汤勇华等, 2008, 2009; 曾祥明等, 2012)。汤勇华等(2009)将土壤粘粒含量、有机质、全氮、速效磷和速效钾含量, 以及氮磷钾的交互作用(TN×AP, TN×AK, AP×AK, TN×AP×AK)等土壤参数和气候因子加总, 得到不同作

物和不同种植区域的作物基础地力贡献率模型,其中南方单季稻的统计模型为:

$$PSFC = 52.4 + 0.22x_4 + 0.48x_6 \quad (11)$$

式中: $PSFC$ 表示基础地力贡献率, x_4 表示粘粒含量 (Clay)/%; x_6 表示速效磷 (AP)/(mg/kg)。

南方冬小麦的统计模型(汤勇华等, 2009)如下:

$$PSFC = -95.7 + 3.37x_2 + 1.34x_3 + 2.21x_5x_6 + 25.21 \times 10^{-3}x_6x_7 - 29.39 \times 10^{-3}x_5x_6x_7 \quad (12)$$

式中: x_2 为纬度; x_3 表示土壤有机质 (SOM)/(g/kg); x_5 表示土壤全 N 含量 (TN)/(g/kg); x_6 表示速效磷 (AP)/(mg/kg); x_7 表示土壤速效钾 (AK)/(mg/kg)。

由于沿海地区土壤盐分对作物产量产生很大的影响,根据联合国粮农组织 (FAO) 有关土壤盐分与作物减产的数量关系和 Maas-Hoffman 模型 (Mass et al, 1977; Ayers et al, 1985) 得到土壤盐分和水稻和小麦作物产量的数学关系,如式 (13) 和 (14) 所示。土壤盐分含量与土壤饱和电导率数学关系如式 (15) 所示。

$$\begin{cases} y = 100, & x \leq 3 \\ y = 100 - 12 \times (x - 3), & 3 < x < 11.33 \\ y = 0, & x \geq 11.33 \end{cases} \quad (13)$$

式中: y 表示水稻相对产量/%; x 表示土壤饱和电导率/(ds/m)。

小麦相对产量与土壤盐分的关系如下:

$$\begin{cases} y = 100 & x \leq 6 \\ y = 100 - 7.1 \times (x - 6), & 6 < x < 20.08 \\ y = 0 & x \geq 20.08 \end{cases} \quad (14)$$

式中: y 表示小麦相对产量/%; x 表示土壤饱和电导率/(ds/m)。

$$ECe = 19SS - 0.46 \quad (15)$$

式中: ECe 表示土壤饱和电导率/(ds/m); SS 表示土壤盐分含量/%。

3 研究区域与数据

3.1 研究区概况

如东县位于江苏沿海地区 (120°42'~121°22'E, 32°12'~32°36'N), 海岸线长 106 km, 主要受亚热带和海洋性季风气候影响, 光照与降水量充足, 年平均气温为 15℃。潮滩是如东县最宝贵的自然资源之一, 总面积为 6.93 万 hm^2 。近代以来如东县一直开展滩涂围垦工作, 用于农业生产、水产养殖以及国营盐场(任美镠, 1996)。1951-2010 年, 如东县沿

海滩涂共围垦了 20 个垦区, 围垦面积约 3.46 万 hm^2 。与其他沿海县市相似, 1990 年前滩涂围垦靠人工工作; 1991-2000 年靠人机结合; 2000 年以来靠机械化作业, 随着围垦技术的提高, 如东县起围高程不断降低。如东县是江苏沿海滩涂围垦的典型县市之一, 其老北坎垦区、洋东垦区、新北坎垦区、东凌垦区、凌洋垦区、豫东垦区等主要用于农业生产和水产养殖。本文研究区包括老北坎垦区、新北坎垦区、东凌垦区和豫东垦区, 如表 4 和图 1 所示。

3.2 研究数据

本文所用气象数据来自江苏省气象中心如东气象站和吕泗气象站, 主要包括辐射、温度、降水、湿度、风等。本文通过 2012 年在如东县不同年限滩涂围垦区 (包括老北坎垦区、新北坎垦区、东凌垦区和豫东垦区) 采集 0~10 cm 土壤表层样品 (图 1), 并带回实验室进行风干, 测定土壤粒度、土壤全氮、土壤有机质、土壤速效磷、土壤速效钾等项目。土壤粒度采用激光粒度分析方法; 土壤全氮采用凯氏定氮法; 土壤有机质采用重铬酸钾氧化—外加热法测定; 土壤速效磷采用 H_2SO_4 —高氯酸消煮—铝蓝比色法测定; 土壤速效钾 (AK) 采用乙酸铵浸提—火焰光度法测定。2014 年 5 月底 (小麦即将收割时期) 对不同年限滩涂围垦区水稻和小麦产量进行实地调研。

表 4 如东县滩涂围垦区情况表

Tab.4 Basic information of reclamation zones in Rudong County, Jiangsu Province

垦区名称	围垦年限	围垦面积/ hm^2	起围高程/m	围堤长度/km
豫东	2007	2067	2.5	13.35
东凌	1982	3400	3.0~4.0	16.58
新北坎	1974	2133	3.0~3.5	13.60
老北坎	1951	1200	3.0~3.5	7.00

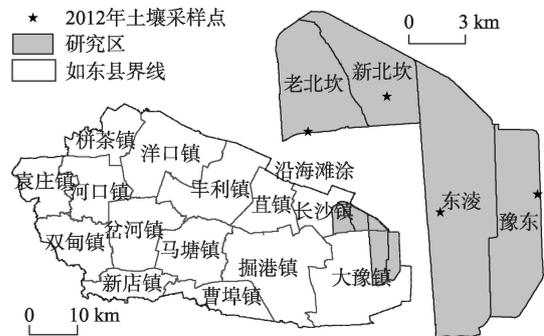


图 1 研究区和采样点示意图

Fig.1 Location of the study area and soil sampling sites

4 结果与分析

4.1 光温水生产潜力

水稻—小麦轮作是江苏沿海地区农业最主要的轮作方式之一。江苏沿海地区水稻和小麦粮食作物不同生育期光照辐射、降水和气温如表5。水稻生育期内苗期、营养生殖生长期和灌浆成熟期光照辐射最强,而这3个时期降雨量最小,平均气温差异较小,结合水稻不同生长期对温度和湿度的敏感系数,得到水稻产量在这3个生育期间受到水分因子影响很大,通过式(8)-(10)计算得到江苏省沿海地区水稻水分修正系数在苗期、营养生殖生长期以及成熟期分别为0.83、0.77和0.91(表6)。而在小麦生育期内,虽然营养生长期和营养生殖生长期光照辐射较强,降雨量充足,但平均气温相对较低,此阶段小麦干物质积累受到温度影响较大,结合小麦不同生长期对温度和湿度的敏感系数,通过公式(6)-(7)得到小麦在营养生长期、营养生殖生长期以及营养灌浆期的温度修正系数分别为0.19、0.55和0.65(表6)。

通过式(1)计算得到:江苏省沿海地区水稻和小

表5 江苏沿海地区如东县气候因子情况表

Tab.5 Climatic factors of Rudong County in the coastal zone of Jiangsu Province

	水稻			小麦		
	光照辐射/ (MJ/m ²)	降水 量/mm	平均气 温/°C	光照辐射/ (MJ/m ²)	降水 量/mm	平均气 温/°C
苗期	558.85	27.2	21.81	172.02	40.4	17.18
营养生长期	382.52	316.6	25.42	980.17	272.6	5.08
营养生殖生 长期	601.68	22.7	28.97	647.45	128.2	10.14
营养灌浆期	459.20	176.0	25.40	476.01	49.5	18.67
灌浆成熟期	676.65	40.8	19.22	558.85	27.2	21.81

表6 沿海地区气候因子修正系数

Tab.6 Climate correction coefficient in the Jiangsu coastal zone

	水稻		小麦	
	温度修 正系数	水分修 正系数	温度修 正系数	水分修 正系数
苗期	0.99	0.83	1.00	1.00
营养生长期	1.00	1.00	0.19	1.00
营养生殖生长期	0.98	0.77	0.55	1.00
营养灌浆期	0.99	1.00	0.65	0.90
灌浆成熟期	1.00	0.91	0.83	1.00

麦光合生产潜力分别为24266.21和20144.56 kg/hm²;光温生产潜力分别为24106.97和10549.15 kg/hm²;光温水生产潜力分别为21469.18和10329.39 kg/hm²。

4.2 土壤有效系数

江苏沿海地区土壤肥力贫瘠、盐分高、物理性质较差(表7),1949年以来滩涂围垦区的土壤有机质约为1.57%,新围垦的2007年豫东垦区土壤盐分高达0.82%,对作物生长有明显的胁迫作用。本文用基础地力贡献度和盐分阻碍因子来表达土壤有效性系数,与以往的土壤质量综合评价作为土壤有效性系数相比,更能量化反映土壤属性与作物产量之间的关系。通过计算得到随着沿海滩涂围垦区基础地力贡献率仅为50%左右,土地生产潜力受到土壤肥力等因素的限制较大。从不同作物种类来看,如东县滩涂围垦区水稻的基础地力贡献率约为55%~59%(表8);随着滩涂围垦年限的增加,耕地质量不断改良,土壤基础地力贡献率总体呈现上升趋势;冬小麦基础地力贡献率约为50%~80%。随着滩涂围垦年限增加,由于土壤速效钾含量减少,土壤基础地力贡献率不断降低。

土壤盐分是沿海地区作物生产主要的限制因子,通过影响作物根部渗透压以及离子毒害两方面来影响作物产量,因此需要盐分阻碍系数综合反映

表7 如东县不同年限滩涂围垦区土壤理化性质

Tab.7 Soil physical and chemical properties in the reclamation zones of Rudong County

年限	纬度/°	有机质 /(g/kg)	全氮 /(g/kg)	速效磷 /(mg/kg)	速效钾 /(mg/kg)	粘粒/%	盐分/%
1951	32.37	18	0.06	11.56	41.66	4.68	0.04
1974	32.39	17.2	0.03	7.20	84.56	4.32	0.09
1982	32.33	14.6	0.05	6.06	204.59	7.66	0.30
2007	32.34	15.7	0.03	4.98	367.12	2.75	0.82

表8 沿海地区不同年限滩涂围垦区土壤基础地力贡献和盐分阻碍因子系数

Tab.8 Percentage of soil fertility contribution (PSFC) and salinity factor coefficients in the reclamation zones of Rudong County

围垦年限	基础地力修正系数/%		盐分限制因子系数	
	水稻	小麦	水稻	小麦
1951	58.98	50.35	1.00	1.00
1974	56.81	51.79	1.00	1.00
1982	56.99	62.95	0.73	1.00
2007	55.40	79.11	0.00	0.35

土壤盐分对作物产量的影响。江苏沿海滩涂土壤属于典型的滨海盐土,经人类围垦农业耕作后,土壤盐分不断降低。1951年围垦的老北坎垦区和1974年围垦的新北坎垦区已经基本处于脱盐状态,因此作物生长不受土壤盐分限制;而1982和2007年滩涂围垦区土壤盐分分别为0.3%和0.8%。通过计算得到水稻盐分修正系数分别为0.73和0;小麦盐分修正系数分别为1和0.35。在2007年垦区盐分很高部分区域,基本不能种植水稻和小麦等粮食作物。

4.3 土地生产潜力及验证比较

通过式(1)对气候生产潜力进行土壤有效系数修正计算得到水稻、小麦的生产潜力(表9):江苏省沿海地区1951、1974、1982滩涂围垦区土地水稻生产潜力分别为12661.77、12195.89、8934.97 kg/hm²,2007年滩涂围垦区由于盐分较高尚不能种植水稻;小麦生产潜力分别为5200.40、5349.26、6502.23和2880.24 kg/hm²。对1951、1974、1982和2007年滩涂围垦区水稻和小麦气候生产潜力仅进行盐分修正得到:1951、1974、1982年滩涂围垦区水稻生产潜力分别为21469.18、21469.18、15677.42 kg/hm²;1951、1974、1982和2007年滩涂围垦区小麦生产潜力分别为10329.39、10329.39、10329.39和3640.90 kg/hm²。

通过对1951、1974、1982和2007年滩涂围垦区进行水稻和小麦产量调研,得到1951、1974和1982年水稻产量大约在7500~9750 kg/hm²,小麦的产量约在5250~7500 kg/hm²;2007年滩涂垦区不种植水稻,小麦产量为4875 kg/hm²。与实地调查的水稻产量(9750 kg/hm²)和小麦生产潜力(6000 kg/hm²)相比,1982年垦区现实土地生产力远小于盐分限制下

的土地生产潜力,与基础地力和盐分双重限制下的土地生产潜力接近。

5 结论与讨论

江苏沿海滩涂围垦区水稻和小麦光温水生产潜力为21469.18和10329.39 kg/hm²,由于不同年限滩涂围垦区土壤质量差异较大,1951、1974、1982年滩涂围垦区土地水稻生产潜力分别为12661.77、12195.89、8934.97 kg/hm²,2007年滩涂围垦区由于盐分较高尚不能种植水稻;1951、1974、1982和2007年滩涂围垦区小麦生产潜力分别为5200.40、5349.26、6502.23和2880.24 kg/hm²。

通过实地产量调查与本文土地生产潜力模型结果对比,在江苏沿海滩涂围垦区引进基础地力贡献率和盐分限制因子系数作为土壤有效系数的土地生产潜力模型具有一定的可行性。基于统计学和实验数据以及Maas-Hoffman模型得到的土壤基础地力以及土壤盐分与作物产量关系来确定土壤有效性系数(汤勇华等,2008,2009),相对于主观地对土壤因子进行评价打分更具有可行性。基础地力贡献率计算结果一般在20%~75%,与气候因子、作物类型和土壤特性相关,能够真实地反映土壤质量对土地农业生产潜力的影响,要优于以往的土壤有效系数只考虑土壤特性评价分级。因此,基础地力贡献率更能体现出不同地域土壤养分对农业生产潜力的贡献程度。同时,土壤盐分是沿海滩涂围垦区农业生产的主要限制性因子,考虑土壤盐分更能显示研究区的特殊性和典型性。

沿海滩涂围垦区土地生产潜力模型能为江苏沿海开发中不断新增的耕地资源开展评价,并为估算出粮食生产潜力提供手段与方法。需要说明的是,本文基础地力贡献率和盐分限制因子是采用国内外已有的研究成果(含联合国有关标准),为保证测算更具精确性,今后有必要在当地设计实验方案,测算出本地土壤基础地力和盐分对光温水生产潜力实现的限制程度。

参考文献(References)

曹卫星. 2006. 作物栽培学总论[M]. 北京: 科学出版社. [Cao W X. 2006. The theory of crop cultivation[M]. Beijing, China: Science Press.]
 蔡承智, Van Velthuisen H, Fischer G, 等. 2007. 基于AEZ模

表9 沿海滩涂围垦区土地生产潜力模型

Tab.9 Land productivity in the Jiangsu coastal reclamation zones

围垦 年限	土地生产潜力/(kg/hm ²)					
	基础地力修正		盐分修正		基础地力和盐分修正	
	水稻	小麦	水稻	小麦	水稻	小麦
1951	12661.77	5200.40	21469.18	10329.39	12661.77	5200.40
1974	12195.89	5349.27	21469.18	10329.39	12195.89	5349.27
1982	12235.84	6502.23	15677.42	10329.39	8934.97	6502.23
2007	11893.60	8171.36	—	3640.90	—	2880.24

注:“—”表示垦区内不能种植水稻作物。

- 型的我国农区小麦生产潜力分析[J]. 中国生态农业学报, 15(5): 182-184. [Cai C Z, Van Velthuisen H, Fischer G, et al. 2007. Analyses of wheat yield potential by AEZ model on the basis of Chinese farming system zonation [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 15(5): 182-184.]
- 陈超, 于强, 王恩利, 等. 2009. 华北平原作物水分生产力区域分异规律模拟[J]. 资源科学, 31(9): 1477-1485. [Chen C, Yu Q, Wang E L, et al. 2009. Modeling the spatial distribution of crop water productivity in the North China Plain[J]. Resources Science, 31(9): 1477-1485.]
- 陈建文, 贺安乾, 杨碧轩, 等. 1999. 陕北、渭北及关中气候生产潜力的估算与分布特征分析[J]. 干旱地区农业研究, 17(1): 112-117. [Chen J W, He A Q, Yang B X, et al. 1999. Estimation and analysis of climatic potential productivity in arid and semiarid areas of Shaanxi Province [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 17(1): 112-117.]
- 邓祥征, 姜群欧, 战金艳. 2009. 中国土地生产力变化的情景分析[J]. 生态环境学报, 18(5): 1835-1843. [Deng X Z, Jiang Q O, Zhan J Y. 2009. Scenario analyses of land productivity in China[J]. Ecology and Environmental Sciences, 18(5): 1835-1843.]
- 韩士群, 严少华, 张建秋, 等. 2009. 滩涂池塘生态系统的光合能量利用及其影响因子[J]. 生态学报, 29(2): 1038-1047. [Han S Q, Yan S H, Zhang J Q, et al. 2009. Impact factors of photosynthesis energy utilization in the coastal fish ponds of Jiangsu Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 29(2): 1038-1047.]
- 侯光良, 刘允芬. 1985. 我国气候生产潜力及其分区[J]. 资源科学, 9(6): 52-59. [Hou G L, Liu Y F. 1985. The climate potential productivity in China and the zoning[J]. Resources Science, 9(6): 52-59.]
- 蒋蕊竹, 李秀启, 朱永安, 等. 2011. 基于MODIS黄河三角洲湿地NPP与NDVI相关性的时空变化特征[J]. 生态学报, 31(22): 6708-6716. [Jiang R Z, Li X Q, Zhu Y A, et al. 2011. Spatial-temporal variation of NPP and NDVI correlation in wetland of Yellow River Delta based on MODIS data[J]. Acta Ecologica Sinica, 31(22): 6708-6716.]
- 冷疏影. 1992. 地理信息系统支持下的中国农业生产潜力研究[J]. 自然资源学报, 7(1): 71-79. [Leng S Y. 1992. Research on the potential agricultural productivity of China with the help of GIS[J]. Journal of Natural Resources, 7(1): 71-79.]
- 李春云, 戴玉杰, 宋玉红, 等. 2001. 蒸发势的一种计算方法[J]. 应用气象学报, 12(1): 91-96. [Li C Y, Dai Y J, Song Y H, et al. 2001. A method for calculating the evaporation potential[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 12(1): 91-96.]
- 梁佳勇, 谢振文, 何昆明, 等. 2004. 广东水稻生产潜力及影响因素分析[J]. 农业与技术, 24(4): 63-66. [Liang J Y, Xie Z W, He K M, et al. 2004. Analysis of rice potential productivity and its affect factors in Guangdong Province [J]. Agriculture and Technology, 24(4): 63-66.]
- 林文鹏, 陈逢珍, 陈霖婷, 等. 2000. GIS支持下的漳州市水稻气候生产潜力研究[J]. 福建地理, 15(1): 30-36. [Lin W P, Chen F Z, Chen L T, et al. 2000. A study of climate productive potentiality based on GIS of paddy rice in Zhangzhou[J]. Fujian Geography, 15(1): 30-36.]
- 任美镠. 1950. 四川省农作物生产力地理分布[J]. 地理学报, 16(1): 1-22. [Ren M E. 1950. The geographical distribution of crop productivity in Szechuan Province, China[J]. Acta Geographica Sinica, 16(1): 1-22.]
- 任美镠. 1996. 江苏省海岸带和海涂资源综合调查报告[R]. 北京: 海洋出版社. [Ren M E. 1996. The integrated survey report of coastal zone and tidal flat resources in Jiangsu Province[R]. Beijing, China: Ocean Press.]
- 汤勇华, 黄耀. 2008. 中国大陆主要粮食作物基础地力贡献率及其影响因素的统计分析[J]. 农业环境科学学报, 27(4): 1283-1289. [Tang Y H, Huang Y. 2008. Statistical analysis of the percentage of soil fertility contribution to grain crop yield and driving factors in mainland China[J]. Journal of Agro-environment Science, 27(4): 1283-1289.]
- 汤勇华, 黄耀. 2009. 中国大陆主要粮食作物基础地力贡献率和基础产量的空间分布特征[J]. 农业环境科学学报, 28(5): 1070-1078. [Tang Y H, Huang Y. 2009. Spatial distribution characteristics of the percentage of soil fertility contribution and its associated basic crop yield in mainland China[J]. Journal of Agro-environment Science, 28(5): 1070-1078.]
- 杨重一, 庞士力, 孙彦坤. 2010. 黑龙江省作物气候生产潜力估算[J]. 东北农业大学学报, 41(3): 75-78. [Yang C Y, Pang S L, Sun Y K. 2010. Calculation of crop climatic potential productivity in Heilongjiang Province[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 41(3): 75-78.]
- 杨恒山, 王芳, 张冬梅, 等. 1999. 哲里木盟4种主要农作物气候生产潜力变化及对比分析[J]. 内蒙古民族大学学报, 9(2): 19-24. [Yang H S, Wang F, Zhang D M, et al. 1999. A comparative analysis on the potential productivities of the main crops in Zhelimu League impacted by climatic variation[J]. Journal of Inner Mongolia University for Nationalities, 9(2): 19-24.]

- 尹海霞, 张勃, 张建香, 等. 2012. 近 50 年来甘肃省河东地区春玉米干旱时空特征分析[J]. 资源科学, 34(12): 2347-2355. [Yin H X, Zhang B, Zhang J X, et al. 2012. Spatial-temporal characteristics of drought and spring maize in eastern Gansu[J]. Resources Science, 34(12): 2347-2355.]
- 尹钧, 苗果园. 1992. 山西省小麦气候生产潜力的评价[J]. 山西农业大学学报, 12(3): 276-282. [Yin J, Miao G Y. 1992. Evaluation of the meteorological potentiality of wheat production in Shanxi[J]. Journal of Shanxi Agricultural University, 12(3): 276-282.]
- 鄢文聚, 王洪波, 王国强, 等. 2007. 基于农用地分等与农业统计的产能核算研究[J]. 中国土地科学, 21(4): 32-37. [Yun W J, Wang H B, Wang G Q, et al. 2007. Research of throughput calculation based on agricultural land classification and agriculture statistics[J]. China Land Science, 21(4): 32-37.]
- 王千, 金晓斌, 周寅康. 2011. 江苏沿海地区耕地景观生态安全格局变化与驱动机制[J]. 生态学报, 31(20): 5903-5909. [Wang Q, Jin X B, Zhou Y K. 2011. Dynamic analysis of coastal region cultivated land landscape ecological security and its driving factors in Jiangsu[J]. Acta Ecologica Sinica, 31(20): 5903-5909.]
- 王志强, 刘宝元, 王旭艳, 等. 2009. 东北黑土区土壤侵蚀对土地生产力影响试验研究[J]. 中国科学: 地球科学, 39(10): 1397-1412. [Wang Z Q, Liu B Y, Wang X Y, et al. 2009. The experimental study of soil erosion in black soil region of Northeast China on the influence of land productivity[J]. Science China: Earth Sciences, 39(10): 1397-1412.]
- 曾祥明, 韩宝吉, 徐芳森, 等. 2012. 不同基础地力土壤优化施肥对水稻产量和氮肥利用率的影响[J]. 中国农业科学, 45(14): 2886-2894. [Zeng X M, Han B J, Xu F S, et al. 2012. Effect of optimized fertilization on grain yield of rice and nitrogen use efficiency in paddy fields with different basic soil fertilities[J]. Scientia Agricultura Sinica, 45(14): 2886-2894.]
- 郑海霞, 封志明, 游松财. 2003. 基于 GIS 的甘肃省农业生产潜力研究[J]. 地理科学进展, 22(4): 400-408. [Zhen H X, Feng Z M, You S C. 2003. A study on potential land productivity based on GIS technology in Gansu province[J]. Progress in Geography, 22(4): 400-408.]
- 郑剑非, 卢志光. 1982. 北京市冬小麦气候生产潜力及干旱期间最佳灌水方案[J]. 中国农业气象, 4(4): 18-32, 29. [Zhen J F, Lu Z G. 1982. The climate potential productivity of wheat in Beijing and the optimal irrigation scheme during the drought[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 4(4): 18-32, 29.]
- 张强, 杨贤为, 黄朝迎. 1995. 近 30 年气候变化对黄土高原地区玉米生产潜力的影响[J]. 中国农业气象, 16(6): 19-23. [Zhang Q, Yang X W, Huang C Y. 1995. Impact of climatic variation in maize productive capacity in the Loess Plateau area in recent 30 years[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 16(6): 19-23.]
- 周利民, 罗怀彬, 古璇清. 2002. 水稻水分生产函数模型试验研究[J]. 广东水利水电, 31(2): 22-24. [Zhou L M, Luo H B, Gu X Q. 2002. The experimental study of the modeling of rice water productivity function[J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 31(2): 22-24.]
- 周生路, 吕蕾. 2006. 江苏沿海耕地资源量空间分布态势与评价[J]. 土壤, 38(6): 794-799. [Zhou S L, Lv L. 2006. Spatial distribution of farmland resources in the coastal region of Jiangsu[J]. Soils, 38(6): 794-799.]
- 竺可桢. 1964. 论我国气候的几个特点及其与粮食作物生产的关系[J]. 地理学报, 30(1): 189-199. [Zhu K Z. 1964. Several features of the climate in China and its relationship with grain crops production[J]. Acta Geographica Sinica, 30(1): 189-199.]
- Ayers R S, Westcot D W. 1985. Water quality for agriculture [M]. Rome, Italy: FAO.
- Maas E, Hoffman G. 1977. Crop salt tolerance\current assessment[J]. Journal of the Irrigation and Drainage Division, 103(2): 115-134.

Potential land productivity of the coastal reclamation zones of Rudong County, Jiangsu Province

XU Yan¹, PU Lijie^{1,2*}, YU Xue¹, ZHU Ming¹, CAI Fangfang¹

(1. School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China;

2. Key Laboratory of the Coastal Zone Exploitation and Protection, Ministry of Land and Resources, Nanjing 210023, China)

Abstract: The Jiangsu muddy coastal zone is one of the key bases of cropland complementary resources in China. In 2009, the Chinese government approved the development plan of the Jiangsu coastal zone, wherein the tidal flat will be reclaimed and developed into new farmland. Potential land productivity in the coastal area can reflect its capacity to supply food for the country, and is the basis for maintaining the sustainability of the regional agricultural production. There exist various potential land productivity models in China and worldwide. Models based on the process of crop physiology and ecology were used at the field scale, such as the Crop-Environment Resource Synthesis System (CERES) and World Food Studies (WOFOST). Land productivity models based on light, temperature, precipitation, and soil properties—the Classification and Evaluation Techniques of Farmland and Evaluation System of Land Productivity (ESLP)—have been used in China. However, the soil validation coefficients in these two models are based on the evaluation of soil quality and did not consider the relationship between crop yields and soil properties. This article takes the reclamation zones in Rudong County, Jiangsu Province as a case study and attempts to improve the soil validation coefficient in potential land productivity models. It incorporates the percentage of soil fertility contribution (PSFC) and soil salinity factor as soil validation coefficients into the model of potential land productivity to reflect the quality of land. We used the field survey data on rice and wheat yields to verify the feasibility of the potential land productivity model in the coastal area of China. The results show that the PSFC of rice production in the Jiangsu coastal area was about 55%~59%. The PSFC of wheat production in the study area was 50%~80%. The rice and wheat production in the reclamation zones in 1951 and 1974 was not affected by soil salinity because the soils in these reclamation zones were not saline. The rice and wheat production in the reclamation zones in 1982 and 2007 were influenced by soil salinity. The salinity factors of rice and wheat production in the reclamation zones in 1982 were 0.73 and 1.00, respectively. The salinity factors of rice and wheat production in the reclamation zones in 2007 were 0 and 0.35. In 2007 the soil in the reclamation zone was no longer suitable for growing rice paddy. The rice and wheat potential productivity corrected by PSFC in the un-desalinized reclamation zones in 1982 were 12235.84 and 6502.23 kg/hm². The rice and wheat potential productivity corrected by soil salinity in the un-desalinized reclamation zones in 1982 were 15677.42 and 10329.39 kg/hm². The rice and wheat potential productivity corrected by PSFC and soil salinity in the un-desalinized reclamation zones in 1982 were 8934.97 and 6502.23 kg/hm². The actual field yields of rice and wheat (9750 and 6000 kg/hm²) are consistent with the potential productivity corrected by PSFC and soil salinity, and is far less than the potential productivity corrected by soil salinity. Improved fertilization can increase land production. The result of this research can be useful for evaluating newly reclaimed farmland resources and for calculating crop production in the coastal reclamation zones.

Key words: potential land productivity; percentage of soil fertility contribution; salinity factor; soil validation coefficient; Jiangsu coastal area