DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2025.05.023 **CSTR: 32214.14.tr202408270337**

高渊, 乔晓英, 陈小兵, 等. 苏北滨海盐碱化耕地水稻净灌溉需水量研究. 土壤, 2025, 57(5): 1145–1151.

苏北滨海盐碱化耕地水稻净灌溉需水量研究①

高 渊[1,4,5], 乔晓英[1,2,3*], 陈小兵[4*], 张 新[5], 谢文萍[5], 王相平[5], 姚荣江[5], 刘广明[5]

(1 长安大学水利与环境学院，西安 710054； 2 旱区地下水与生态效应教育部重点实验室，西安 710054；3 水利部旱区生态水文与水安全重点实验室，西安 710054；4 中国科学院海岸带环境过程与生态修复实验室，山东烟台 264003；5 中国科学院南京土壤研究所，南京 211135)

摘 要：基于江苏省东台市 1998—2020 年的日气象数据，采用 FAO 推荐的 Penman-Monteith 方法和单作物系数法，计算了该地区主要种植作物水稻在非盐渍土和盐渍土上的全生育期需水量、有效降水量及净灌溉需水量。结果表明：①对于土壤全盐含量小于水稻耐盐阈值 1.92 g/kg 的非盐渍土，水稻的净灌溉需水量为 301.0 ~ 594.7 mm，多年平均净灌溉需水量为 446.3 mm；②对于土壤全盐含量大于 1.92 g/kg 的盐渍土，水稻的净灌溉需水量为 478.4 ~ 848.3 mm，多年平均净灌溉需水量为 660.5 mm，考虑到种植前的灌水压盐过程，实际净灌溉需水量高达 712.7 ~ 1 317.1 mm；③1998—2020 年水稻净灌溉需水量极不稳定，呈现明显的年际变化，且浮动区间逐渐变大，面临旱涝灾害几率增加，净灌溉需水量预测更加困难；④不需要淋洗的非盐渍土种植水稻的多年平均水分亏缺指数为 –0.68，需要淋洗的盐渍土种植水稻的多年平均水分亏缺指数为 –0.77，水分亏缺巨大，需要加强区域灌溉系统研究。

关键词：滨海盐碱地；水稻需水量；净灌溉需水量；东台市

中图分类号：S135 **文献标志码：**A

Study on Net Irrigation Water Requirement for Rice in Saline-Alkali Farmland in Coastal Northern Jiangsu

GAO Yuan[1,4,5], QIAO Xiaoying[1,2,3*], CHEN Xiaobing[4*], ZHANG Xin[5], XIE Wenping[5], WANG Xiangping[5], YAO Rongjiang[5], LIU Guangming[5]

(1 *School of Water and Environment*, *Chang'an University*, *Xi'an* 710054, *China*; 2 *Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effects in Arid Region*, *Ministry of Education*, *Xi'an* 710054, *China*; 3 *Key Laboratory of Ecohydrology and Water Security in Arid Regions*, *Ministry of Water Resources*, *Xi'an* 710054, *China*; 4 *Laboratory of Coastal Environmental Processes and Ecological Remediation*, *Chinese Academy of Sciences*, *Yantai*, *Shandong* 264003, *China*; 5 *Institute of Soil Science*, *Chinese Academy of Sciences*, *Nanjing* 211135, *China*)

Abstract: Based on daily meteorological data from 1998 to 2020 in Dongtai City, Jiangsu Province, FAO-recommended Penman-Monteith method and a single crop coefficient approach were applied to calculate the full growing season water requirement, effective precipitation and net irrigation water requirement for rice grown on non-saline and saline soils. The results showed that for non-saline soil with a total soil salt content below the rice salt tolerance threshold of 1.92 g/kg, the net irrigation water requirement for rice ranged from 301.0 mm to 594.7 mm, with a multi-year average of 446.3 mm, but for saline soil with a total salt content exceeding 1.92 g/kg, which ranged from 478.4 mm to 848.3 mm, with a multi-year average of 660.5 mm. If considering pre-planting leaching to suppress salt levels, the actual net irrigation water requirement would increase to 712.7–1 317.1 mm. The net irrigation water requirement for rice was highly variable from 1998 to 2020, with significant interannual fluctuations and a widening range of variation, indicating an increasing risk of drought and flood disasters, and also making it more challenging to predict net irrigation needs. The multi-year average water deficit index for rice was –0.68 for non-saline soil that do not require leaching, which was –0.77 for saline soil that do require leaching, indicating a significant water deficit and underscoring the need for enhanced regional irrigation system research.

Key words: Coastal saline-alkali land in coastal areas; Water requirement of rice; Net irrigation water requirement; Dongtai City

---

①基金项目：陕西省重点研发计划项目(2021ZDLSF05-03)和国家自然科学基金面上项目(42077084)资助。

* 通信作者(xbchen@yic.an.cn；qiaoxiaoy@163.com)

作者简介：高渊(2000—)，男，宁夏银川人，硕士研究生，主要从事地下水文过程与生态效应的研究。E-mail：2039901741@qq.com

江苏省滩涂面积约为 65.3 万 hm^2，约占全国滩涂的 1/4，且仍以每年近 1.3 万 hm^2 的速率向海自然淤长[1]。江苏省盐城市拥有农田 77.3 万 hm^2，其中近 33.3 万 hm^2 由盐碱地开发而来，在滨海盐碱地的改良上具有很强的代表性。盐城市东台市滩涂资源丰富，开发利用潜力巨大[2]，是全国非常重要的后备土地资源。沿海滩涂土地由于其独特的地理特征和成土过程，存在严重的土壤盐碱化问题，极大限制了其农业发展[3]。习近平总书记在对盐碱地考察调研时指出，开展盐碱地综合利用对保障国家粮食安全、端牢中国饭碗具有重要战略意义[4]。因此，对滨海地区盐碱地的改良至关重要。

滨海盐碱地存在地势低洼、地下水埋深浅且矿化度高、排水困难等诸多障碍因素[5]。当前，盐碱地的治理方法主要分为物理调控、化学调理、灌排管理、生物改良 4 种[6]，其中灌排管理是治理盐碱地的主要工程措施，也是使用其他治理方法的基础。净灌溉需水量是指作物生长过程中需要依靠灌溉补充的水量，是灌排管理中的重要参数[7]，能够指导合理灌溉，减少水资源浪费，并有效控制土壤盐分积累。江苏滩涂新围垦的农田主要通过种植水稻来改良，水稻的淹水条件有助于盐分的淋洗，并能带来一定的经济收益。尽管已有许多学者对水稻的作物需水量和净灌溉需水量进行了研究，但诸多研究未考虑滨海盐渍土的特殊情况[8-10]。由于盐分对作物生长的影响，滨海盐渍土种植水稻之前需进行灌溉压盐，而在种植后则需淋洗控盐。由此，本研究基于江苏省东台市 1998—2020 年的日气象数据，计算了水稻在需要灌溉压盐的盐渍土和不需要灌溉压盐的非盐渍土上的净灌溉需水量，并结合水分亏缺指数进行了分析讨论，以为该地区的盐碱地改良提供合理建议和理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况与数据收集

江苏省东台市(32°33′N ~ 32°57′N，120°07′E ~ 120°53′E)地处北亚热带北缘，具有明显的海洋性季风气候，年平均气温 15.0 °C，全年无霜期 213 d，年平均降水量约为 1 059.8 mm，年平均蒸发量为 1 419 mm，大部分降水集中在 5—9 月，年平均风速 3.3 m/s，年平均相对湿度 0.81[11]。东台地区盐渍土是海相沉积物在海潮和高浓度地下水作用下形成的全剖面含盐土壤，土壤盐分组成以氯化钠为主，属于典型的淤泥质海岸滩涂盐渍土[12]。区内淡水资源紧缺，微咸水资源丰富，农田灌溉基本使用微咸水[3]。主要种植的水稻品种为淮稻 5 号和南粳 9108，均为迟熟中粳稻品种，全生育期为 153 d，本研究将水稻生育期起始日期定为 5 月 20 日。

本研究所用数据来自江苏省东台气象站(32°51′N，120°17′ E)1998—2020 年的逐日气象资料，由中国气象数据网下载，数据包括：日平均气温、降水量、日最高气温、日最低气温、日照时数、平均风速、平均相对湿度等。所有气象数据的整理与分析均在 Python 环境下完成，包括异常值剔除、缺失值插补及数据分析等。

1.2 作物需水量计算

作物需水量是指作物生长发育所需要消耗的水量，包括作物蒸腾、棵间蒸发和构成作物组织的水量[13]。由于构成作物组织的水量一般很小，在实际计算中通常忽略不计，因此以作物蒸腾量与棵间蒸发量之和，即蒸发蒸腾量作为作物需水量的主要部分。本研究采用众多学者认可的 FAO 推荐的单作物系数法计算水稻的逐日需水量[14-16]，计算公式如下：

$$ET_{ct} = K_{ct} ET_{0t} \tag{1}$$

式中：ET_{ct} 为第 t 天水稻的作物需水量，mm/d；K_{ct} 为第 t 天水稻的作物系数；ET_{0t} 为第 t 天参考作物需水量(即在土壤水分充足、地面完全覆盖、作物生长正常且整齐的开阔地块上，高 8~15 cm 的矮草地的蒸发蒸腾量)，为 mm/d。

1.2.1 参考作物需水量计算　经国内外大量试验研究证明，Penman-Monteith 公式[17]计算得到的参考作物需水量与实际蒸散量最接近，适用于估算不同地区参考作物需水量，因此参考作物需水量 ET_0 采用 FAO 推荐的 Penman-Monteith 公式[17]进行计算，计算公式如下：

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \tag{2}$$

式中：ET_0 为参考作物需水量，mm/d；Δ 为水汽压曲线斜率，kPa/°C；R_n 为冠层表面净辐射，MJ/(m^2·d)；G 为土壤热通量密度，MJ/(m^2·d)；T 为地面以上 2 m 处的平均气温，°C；u_2 为地面以上 2 m 处风速，m/s；e_s 为饱和水汽压，kPa；e_a 为实际水汽压，kPa；γ 为湿度计常数，kPa/°C

1.2.2 作物系数的确定　作物系数是某种作物的潜在蒸散量与参考蒸散量之比，它反映不同作物与参考作物的区别，是根据参考蒸散量计算实际作物需水量的重要参数，通常用 K_c 表示[18]。江苏滨海农田种植水稻为迟熟中粳稻品种，全生育期 153 d，其生育

期与 FAO56 推荐值基本吻合，因此，本研究采用 FAO 推荐的作物生育阶段划分值和作物系数推荐值[19]。FAO56 推荐确定作物系数的方法为分段单值平均法，即将全生育期作物系数变化过程概化为在 4 个阶段的 3 个值，4 个阶段为初始生长期、快速发育期、生育中期和生育后期，3 个值为 $K_{c\ ini}$(初始生长期 K_c 平均值)、$K_{c\ mid}$(生育中期 K_c 平均值)、$K_{c\ end}$(生育后期 K_c 最小值)[20]。水稻生育期划分及作物系数见表 1。

表 1　水稻的生育阶段划分及作物系数值

Table 1　Rice growth stages and crop coefficient values

生育阶段	历时(起讫日期)	作物系数 K_c
初始生长期	5 月 20 日—6 月 18 日	$K_{c\ ini}$= 1.05
快速发育期	6 月 19 日—7 月 18 日	1.05 线性增加至 1.20
生育中期	7 月 19 日—9 月 16 日	$K_{c\ mid}$ = 1.20
生育后期	9 月 17 日—10 月 19 日	从 1.20 线性下降至 0.90

水稻的作物系数曲线如图 1 所示，初始生长期和生育中期作物系数为定值，快速发育期和生育后期逐日作物系数由下式计算：

$$K_{ct} = K_{cpre} + \left[\frac{i - \sum L_{prev}}{L_{stage}}\right](K_{cnext} - K_{cpreve}) \tag{3}$$

式中：t 表示整个生育期内的日序数；K_{ct} 表示第 t 天的作物系数；L_{stage} 表示 t 天所处的生育期长度(d)；K_{cnext} 表示 t 天之后生育期的作物系数；K_{cprev} 表示 t 天之前生育期的作物系数；ΣL_{prev} 表示 t 天之前所有生育期的总长度(d)。

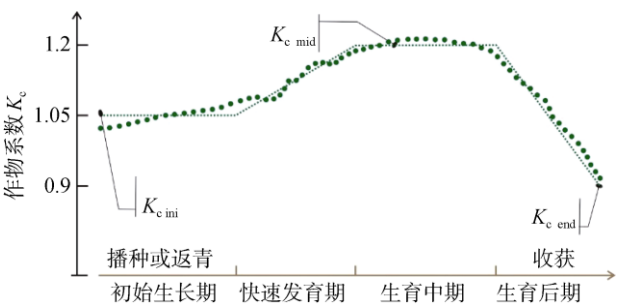

图 1　水稻的作物系数曲线图

Fig. 1　Crop coefficient curve of rice

1.3　有效降水量计算

有效降水量是指降水量中实际被植物利用的部分，或对作物生长有用的降水量，它等于总降水量减去径流量、蒸发量和深层渗漏量。本研究采用美国农业部土壤保持局推荐的方法计算有效降水量，该方法在众多有效降水量计算方法中得到公认和广泛推广，其有效性已在许多学者的研究中得到验证[21]。计算公式如下：

$$P_e = \frac{(P4.17 - 0.2P)}{4.17} \qquad P < 8.3\ \text{mm/d} \tag{4}$$

$$P_e = 4.17 + 0.1P \qquad P \geqslant 8.3\ \text{mm/d} \tag{5}$$

式中：P_e 为有效降水量，mm/d；P 为总降水量，mm/d。

1.4　淋洗需水量计算

淋洗是指向植物根区供给超过实际需水量的灌溉水，从而将根区盐分洗出的过程。多余水量与总灌溉水量之比称为淋洗分数[22]。为有效地控制土壤盐分，需要确保淋洗分数足够大，以防止过多盐分在根区积累。淋洗分为改良淋洗和维持淋洗，改良淋洗在作物种植之前进行(即灌溉压盐过程)，目的是将土壤盐度淋洗到作物可以生长的程度。连续灌溉时淋洗需水量计算公式如下：

$$D_w = (K \times D_s \times EC_{ei}) / EC_{ef} \tag{6}$$

式中：D_w 为改良淋洗需水量，mm；D_s 为需要改良的土壤深度，mm；K 为土壤系数，有机土壤为 0.45，细粒土壤为 0.30，粗粒土壤为 0.10；EC_{ef} 为改良后土壤整体的平均盐度，dS/m；EC_{ei} 为改良前土壤整体的平均盐度，dS/m。

水稻根系分布较浅，其中约 80% ~ 90% 的根系分布在表层 0 ~ 20 cm 土壤中。考虑到土壤返盐和节约灌水，改良深度设置为 0.5 m，改良后土壤含盐量由水稻的耐盐阈值确定，东台市土壤质地为粉砂土，K 取值 0.30。本研究计算了东台市不同盐度盐渍土种植水稻时，所需的改良淋洗需水量，如表 2 所示。根据美国盐土实验室的作物耐盐性资料[23]，本研究区水稻耐盐阈值为 3 dS/m，使用经验换算系数 0.64[19]，换算得土壤盐分含量为 1.92 g/kg。因此，本文中的盐渍土特指盐分含量高于 1.92 g/kg 的土壤，非盐渍土特指盐分含量低于 1.92 g/kg 的土壤。

表 2　东台市不同盐度土壤改良淋洗需水量

Table 2　Leaching water requirement for soil improvement with different salinity in Dongtai

改良前含盐量 (g/kg)	改良后含盐量 (g/kg)	改良深度 (m)	改良淋洗需水量 (mm)
3	1.92	0.5	234.3
4	1.92	0.5	312.5
5	1.92	0.5	390.6
6	1.92	0.5	468.8

在沿海地区和近沙漠地区，大气沉降可能是盐分的重要来源。相关研究指出，滨海田地每公顷每年高达 100 ~ 200 kg 的盐沉降[24]。此外，灌溉也会给土壤带来大量盐分。因此，在土壤初步改良之后，仍然要进行维持淋洗来保持土壤盐度。在相对均一盐分条件

下，可利用下式估算淋洗分数[25]：

$$\mathrm{LR}=\frac{D_{\mathrm{d}}}{D_{\mathrm{i}}}=\frac{\mathrm{EC_i}}{\mathrm{EC_d}} \tag{7}$$

式中：LR 为淋洗分数；D_d 为排出水量(用深度表示)，mm；D_i 为灌溉水量，mm；EC_i 为灌溉水的电导率，dS/m；EC_d 为通过作物根区底部排水的电导率，dS/m。

土壤耕层中容许的最高盐浓度由种植作物的耐盐浓度 EC_e 值决定。在田间灌溉实践中，EC_d 与 EC_e 存在式(8)所示的关系：

$$\mathrm{EC_d}=5\mathrm{EC_e}-\mathrm{EC_i} \tag{8}$$

本研究区内灌溉水的平均电导率约为 3 dS/m，由此计算得通过作物根区底部排水的电导率 EC_d 为 12 dS/m，淋洗分数 LR 为 0.25。

1.5 净灌溉需水量计算

作物需水量中的一部分可由降水供给，降水供给不足的部分需由灌溉补充，作物生长过程中需要依靠灌溉补充的水量为作物的净灌溉需水量[26]。某种作物的净灌溉需水量等于生育期内作物需水量与有效降水量之差。但滨海农田作物的净灌溉需水量还应该包括维持淋洗需水量，计算如下：

$$D=\frac{\mathrm{ET_c}}{1-\mathrm{LR}} \tag{9}$$

$$\mathrm{IR}=D-P_{\mathrm{e}} \tag{10}$$

式中：D 为包含淋洗需水量在内的作物需水量，mm；ET_c 为作物需水量，mm；LR 为淋洗分数；IR 为作物净灌溉需水量，mm；P_e 为作物生育期的有效降水量，mm。

1.6 水分盈亏指数计算

作物水分盈亏指数是农业生产监测的重要指标。它是指在不考虑人工灌水的情况下某时段内农业有效降水量与同一时段作物需水量之差与作物需水量的比值，反映了作物正常发育及生产对水分的需求[27]。当有效降水量小于作物需水量时，说明农田水分供应不足，作物出现缺水。计算公式如下：

$$I=\frac{P_{\mathrm{e}}-\mathrm{ET_c}}{\mathrm{ET_c}} \tag{11}$$

式中：I 为水分亏缺指数；其他符号意义同前。$I>0$ 表明水分有盈余，$I<0$ 表明水分亏缺。

2 结果与分析

2.1 净灌溉需水量

表 3 为 1998—2020 年研究区不考虑灌溉压盐过程的水稻全生育期各项灌溉需水量，包括作物需水量(ET_c)、有效降水量(P_e)、包含淋洗需水量在内的作物需水量(D)、盐渍土条件下的净灌溉需水量(IR)以及非盐渍土条件下的净灌溉需水量($IR_{非}$)。

由表 3 可知，盐渍土条件下水稻净灌溉需水量多年平均值为 660.5 mm，其中 2020 年最低，为 478.4 mm，2013 年最高，为 848.3 mm；非盐渍土条件下多年平均值为 446.3 mm，同样 2020 年最低，为 301.0 mm，2013 年最高，为 594.7 mm。在不考虑灌溉压盐过程的情况下，盐渍土种植水稻的平均净灌溉需水量比非盐渍土高 214.2 mm，增幅接近 50%。非盐渍土和盐渍土水稻多年净灌溉需水量均极不稳定，极高、极低值出现频繁，例如：1999、2002、2003、2004、2012、2013 和 2020 年，净灌溉需水量与多年平均值相差均超过 100 mm；在 1998—2000 年、2002—2004 年、2010—2012 年和 2013—2014 年等相邻年份，年际差值甚至超过 200 mm。

表 3 东台市 1998—2020 年水稻净灌溉需水量(mm)

Table 3 Net irrigation water requirement for rice in Dongtai from 1998 to 2020(mm)

年份	ET_c	P_e	D	IR	$IR_{非}$
1998	671.9	199.1	895.9	696.8	472.8
1999	589.2	245.5	785.6	540.1	343.7
2000	683.9	208.1	911.9	703.8	475.8
2001	655.6	160.7	874.1	713.4	494.9
2002	687.5	150.9	916.7	765.8	536.6
2003	568.2	249.6	757.6	508	318.6
2004	692.8	127.3	923.7	796.4	565.5
2005	640.1	217.7	853.5	635.8	422.4
2006	661.5	189.8	882.0	692.2	471.7
2007	636.7	205.2	848.9	643.8	431.5
2008	598.7	194.0	798.3	604.3	404.7
2009	613.6	189.1	818.1	629.0	424.5
2010	694.9	172.8	926.5	753.8	522.1
2011	596.7	274.0	795.6	521.6	322.7
2012	706.4	130.8	941.9	811.1	575.6
2013	760.9	166.2	1014.5	848.3	594.7
2014	589.9	195.5	786.5	591.0	394.4
2015	618.2	239.7	824.3	584.6	378.5
2016	652.2	262.2	869.6	607.4	390.0
2017	678.1	234.4	904.1	669.7	443.7
2018	647.7	139.1	863.6	724.5	508.6
2019	608.5	138.7	811.3	672.7	469.8
2020	532.1	231.1	709.5	478.4	301.0

2.2 灌溉压盐条件下的灌溉需水量

在滨海盐渍土改良初期，受春季强烈返盐影响[28]，土壤初始盐度通常较高，因此必须在种植前进行灌溉

压盐，以营造适宜水稻生长的低盐环境，保障其正常生长。在计入灌溉压盐及维持性淋洗需水、但不计渠系和田间输水损失的前提下，1998—2020 年东台市不同初始盐度耕地水稻灌溉需水量如表 4 所示。

表 4　灌溉压盐条件下不同盐度耕地的水稻灌溉需水量 (mm)

Table 4　Irrigation water requirement for rice in different salinity lands under leaching condition

年份	改良前盐分 3 g/kg	改良前盐分 4 g/kg	改良前盐分 5 g/kg	改良前盐分 6 g/kg
1998	931.1	1 009.3	1 087.4	1 165.6
1999	774.4	852.6	930.7	1 008.9
2000	938.1	1 016.3	1 094.4	1 172.6
2001	947.7	1 025.9	1 104.0	1 182.2
2002	1000.1	1 078.3	1 156.4	1 234.6
2003	742.3	820.5	898.6	976.8
2004	1030.7	1 108.9	1 187.0	1 265.2
2005	870.1	948.3	1 026.4	1 104.6
2006	926.5	1 004.7	1 082.8	1 161.0
2007	878.0	956.2	1 034.3	1 112.5
2008	838.6	916.8	994.9	1 073.1
2009	863.3	941.5	1 019.6	1 097.8
2010	988.0	1 066.2	1 144.3	1 222.5
2011	755.9	834.1	912.2	990.4
2012	1 045.4	1 123.6	1 201.7	1 279.9
2013	1 082.6	1 160.8	1 238.9	1 317.1
2014	825.3	903.5	981.6	1 059.8
2015	818.9	897.1	975.2	1 053.4
2016	841.7	919.9	998.0	1 076.2
2017	904.0	982.2	1 060.3	1 138.5
2018	958.8	1 037.0	1 115.1	1 193.3
2019	906.9	985.1	1 063.2	1 141.4
2020	712.7	790.9	869.0	947.2

由表 4 可知，在考虑改良初期的灌溉压盐过程后，不同初始盐度条件下的水稻灌溉需水量存在显著差异，且整体处于较高水平。由表 3、表 4 综合可知，通过种植水稻改良滨海盐渍土，改良初期与改良完成后(即无盐渍化问题)的灌溉需水量差距巨大。在改良 0.5 m 深的土壤条件下，土壤含盐量每升高 1 g/kg，改良耗水量增加约 80 mm(表 2)。以土壤含盐量 6 g/kg 的盐渍土为例，改良初期灌溉需水量最大值为 1 317.1 mm(表 4，2013 年)，但改良完成后最小净灌溉需水量为 301.0 mm(表 3，2020 年)，前后差值超过 1 000 mm。如果改良完成后改种其他作物，甚至无需灌溉。这导致滨海地区水利设施的规划建设与水资源管理分配十分困难。

2.3　水分盈亏分析

研究区 1998—2020 年水稻水分盈亏曲线如图 2 所示。由图 2 知，非盐渍土多年平均水分亏缺指数为 –0.68，盐渍土为 –0.77。改良后水稻对水资源的依赖指数普遍减少约 0.1，但依然很高，属于高耗水作物。从节约水资源与节省人力资源的角度来看，非盐渍土应推广种植其他低耗水、无需人工补充灌溉的粮食作物，例如大麦、小麦等，而盐渍土建议种植水稻。

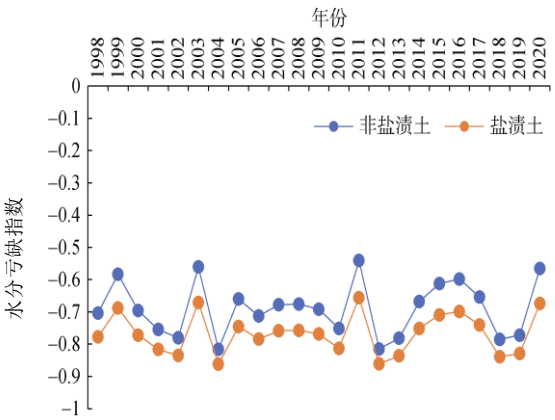

图 2　1998—2020 年水稻水分亏缺指数

Fig. 2　Water deficit index of rice from 1998 to 2020

3　讨论与结论

1) 水稻作为盐碱地改良的先锋作物，在降低土壤盐碱含量与改良土壤结构上具有显著优势。然而，在地下水位较浅的滨海盐碱地，大规模灌溉会将盐分带到地表，加重土壤盐渍化程度。因此，水稻作为高耗水作物，更需严格控制灌溉量，以避免次生盐渍化问题。

2) 从水分盈亏分析结果看，水稻对补充灌溉的依赖性较高，1998—2020 年水稻净灌溉需水量的波动范围逐渐扩大，反映出滨海地区面临的旱涝灾害风险上升。这种年际变化与东台市典型的季风气候、滩涂地理环境以及近年来全球气候异常密切相关。为减轻灌区的水资源调配压力，建议将水稻与抗旱作物如大麦、小麦进行搭配种植。同时，面对水资源需求的波动性及土壤改良的长期性问题，建议推广滴灌、膜下滴灌等节水灌溉技术，并加强水资源管理和智能灌溉系统的应用，以提升灌溉效率。

3) 本研究计算得出苏北地区不同盐碱条件下水稻的净灌溉需水量，与黄河三角洲相关研究结论基本一致[29]。滨海盐碱地的改良耗水高、见效慢，需与作物种植结构优化、水资源合理调配结合起来。但东台市的灌溉水平均盐度高，净灌溉需水量大，结合东

台实际来看，对新围垦的盐碱地进行分区规划、逐片改良，采取水稻、大麦、小麦、油菜等多功能型作物多样化种植模式，通过减少灌区灌水量来控制地下水水位，从而优化盐渍土改良效果，才是东台市盐渍土改良的最佳策略。此外，加强农业生产培训，帮助农民掌握科学灌溉和土壤改良技术，才能实现农业生产的可持续性。

4) 目前国内有关盐分胁迫下作物修正系数的研究较少。FAO56 文件指出，在超频灌溉条件下，蒸发的增加量与蒸腾的减少量相互抵消，对作物需水量计算结果影响较小，但在常规灌溉频率下则需考虑。本文基于超频灌溉条件进行研究，未来可进一步探讨常规灌溉频率下的作物需水量。

综上，滨海盐渍土的改良是一项复杂而长期的工作，需要反复进行排盐和洗盐，以将土壤盐分控制在合理范围内。建议政府和农户应共同制定长远的土壤改良计划，确保可持续农业生产和水资源合理利用。

参考文献：

[1] 卢云，秦天扬，陈玮峰，等. 施用蚓粪对滨海盐碱地土壤有机碳库及其稳定性的影响[J]. 土壤，2024，56(4): 817–825.

[2] 郑旭，赵文静，刘兴满，等. 苏北滨海盐渍土土壤基本性质及其对中山杉生长的影响[J]. 江苏农业学报，2023, 39(9): 1854–1861.

[3] 王相平，杨劲松，姚荣江，等. 苏北滩涂水稻微咸水灌溉模式及土壤盐分动态变化[J]. 农业工程学报，2014, 30(7): 54–63.

[4] 霍宏鑫，杨劲松，姚荣江，等. 复合隔层对河套灌区盐碱土水盐运移的影响[J]. 土壤, 2024, 56(1): 90–96.

[5] 杨劲松. 中国盐渍土研究的发展历程与展望[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 837–845.

[6] 杨劲松，姚荣江，王相平，等. 中国盐渍土研究：历程、现状与展望[J]. 土壤学报, 2022, 59(1): 10–27.

[7] 万义周，吴汉. 淠史杭灌区灌溉期前后再生稻灌溉需水规律及其驱动因素[J]. 江淮水利科技，2024(4): 21–27, 57.

[8] 赵永昶. 滨海盐渍农田土壤盐分微域时空变异特征[D]. 泰安：山东农业大学, 2022.

[9] 李勇，杨晓光，叶清，等. 1961—2007 年长江中下游地区水稻需水量的变化特征[J]. 农业工程学报，2011，27(9): 175–183.

[10] 韩伟锋，武继承，何方. 作物需水量研究综述[J]. 华北水利水电学院学报, 2008, 29(5): 30–33.

[11] 杨鑫，张高洁，姚继周，等. 水杉人工林细根解剖结构和菌根侵染研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2016, 40(6): 97–102.

[12] 李红强，姚荣江，杨劲松，等. 滨海盐渍农田土壤硝化势特征及其影响因素[J]. 应用生态学报，2022，33(8): 2205–2212.

[13] 王洁，姚怀柱，梁森，等. 江苏省冬小麦需水量时空变化特征及气候影响因素分析[J]. 节水灌溉, 2024(5): 107–114.

[14] 姚鑫铭，周祖昊，余根坚. 气候变化对水稻灌溉需水影响研究——以南昌市为例[J]. 中国农村水利水电，2024(9): 102–108.

[15] Liu S M, Sun Z P, Li X W, et al. Comparison of evapotranspiration measurement and estimation methods [J]. Journal of Natural Resources, 2003 (02): 161-167.

[16] Penman H L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass[J]. Proceedings of the Royal Society of London Series A, Mathematical and Physical Sciences, 1948, 193(1032): 120–145.

[17] 李娜，袁成福，罗凤春，等. 1958—2017 年江西省水稻需水量与有效降雨量耦合关系分析[J]. 水资源与水工程学报, 2024, 35(1): 206–216.

[18] Chiraz M C, Olfa M, Hamadi H. Remote sensing and soil moisture data for water productivity determination[J]. Agricultural Water Management, 2022, 263: 107482.

[19] Shao J.The impact of agricultural mechanization on urban-rural income gap and its mechanism[C]//Wuhan Zhicheng Times Cultural Development Co., Ltd.. Proceedings of 5th International Symposium on Economic Development and Management Innovation (EDMI 2023). Beihang University, 2023: 11

[20] 刘钰，汪林，倪广恒，等. 中国主要作物灌溉需水量空间分布特征[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 6–12.

[21] Ling R, Xie C, Qiu C. Study on forest management plan based on forecast of the carbon sequestration and comprehensive value[C]//Wuhan Zhicheng Times Cultural Development Co., Ltd.. Proceedings of 4th International Conference on Business, Economics, Management Science (BEMS 2022). International College, Xiamen University, 2022: 13.

[22] 吴明晏. 黑龙港地区盐碱地治理研究(1950—1980)[D]. 保定：河北大学, 2023.

[23] Gong O. The impact of lignocellulosic ethanol production on the environment from a life cycle perspective[C]// Department of Chemistry & Department of Chemical, Biological and Materials Engineering, University of South Florida, GSES, Tohoku University. Proceedings of the 3rd International Conference on Materials Chemistry and Environmental Engineering(part5). East China University of Science and Technology, 2023:15.

[24] Willem Vlotman, Lambert Smedema, David Rycroft. Modern Land Drainage Planning, Design and Management of Agricultural Drainage Systems[M]. 2nd ed. London: CRC Press, 2020.

[25] 吴普特，赵西宁. 气候变化对中国农业用水和粮食生产的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(2): 1–6.

[26] Cheng Z. The impact of climate change on African food security and economy[C]//George Washington University, Department of Social Sciences, Northumbria University, Department of Kinesiology & Health Education, The Unirsity of Texas at Austin. Proceedings of the

International Conference on Global Politics and Socio-Humanities(part 8). George Washington University, 2023: 5.

[27] Jiang Y,Tian Y,Yu Y. Research on the types of environmental-friendly vegetables[C]//Faculty of Education, Languages, Psychology and Music, SEGi University, School of Optometry. Proceedings of the 2023 International Conference on Modern Medicine and Global Health(part 2). College of Letter and Science, the University of California Davis; The University of California Santa Barbara; The Barstow School Ningbo Campus, 2023: 8.

[28] 陈玉琪，徐灵颖，王志旺，等. 不同盐渍化土壤养分-微生物生物量-胞外酶活的化学计量特征[J/OL]. 土壤学报, 2024: 1–15. (2024-10-23).

[29] 曹丹，易秀，陈小兵. 基于农业灌溉需水量计算的黄河三角洲作物结构优化[J]. 水资源保护，2022，38(2): 154–159, 167.