

水平衡下黄淮海平原区耕地可持续生产能力测算

雷 鸣^{1,2}, 孔祥斌^{1,2}, 王佳宁^{1,2}

(1. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193; 2. 国土资源部农用地质量与监控重点实验室, 北京 100193)

摘要: 为缓解黄淮海平原区地下水水位的持续下降, 国家提出耕地资源休养生息的战略, 而实施耕地资源休养生息的关键, 是确保水平衡下的耕地资源可持续生产能力。本文从可持续理论和水平衡的条件出发, 将黄淮海划分成12个自然条件、社会经济条件相对均一的农业生态区, 采用不同农业生态区代表实验站限水高产的产量和管理经验, 以水定产并逐步修正, 得到了黄淮海平原区耕地可持续生产能力, 并与现实产量对比得到产量差。结果表明: ① 水平衡条件下黄淮海平原区耕地的可持续粮食生产能力为1.16亿t/年; ② 可持续总产量差为-67.85万t/年, 由于限水灌溉造成的粮食产能损失为小麦331.84万t/年, 玉米不存在产能损失; ③ 小麦主要压产地区为黑龙港地区、鲁西平原、豫东平原以及京津唐平原, 而徐淮低平原、豫东平原以及胶西黄泛平原具有一定的提产潜力。通过测算, 进一步认识了黄淮海平原区耕地可持续产能状况, 为区域粮食生产的合理布局以及农业限水限产提供可靠依据。

关键词: 水平衡; 可持续生产能力; 产量差; 黄淮海平原区

DOI: 10.11821/dlxb201803011

1 引言

黄淮海平原区作为中国主要粮食生产区, 其粮食生产稳定与否直接关系国家粮食安全^[1]。2005-2015年, 黄淮海平原区粮食总产量从0.89亿t增加到1.17亿t。在粮食连年高产的背后, 耕地生产在生态环境可持续方面却存在显著不足^[2-3], 黄淮海平原区地下水位快速下降, 已成为世界三大地下水“漏斗群”之一^[4-5]。国家在十八届三中全会提出实施“耕地资源休养生息”战略以及“十三五规划”纲要中“藏粮于地”战略, 说明粮食安全战略的核心并不在于每年粮食产量的增加, 而在于确保耕地的可持续生产能力^[6-7]。

目前, 由于不同学者对上限产量的划分不一致, 关于作物生产能力的理解和界定还存在一定的分歧^[8]。综合国内外研究, 耕地生产潜力主要分为三类: ① 模拟实验潜在产量, 理想状态下光温气候生产潜力模拟计算的产量^[9]; ② 实验站样地产量, 由于在实验中存在一些不可控因素的影响, 该产量一般要低于模型模拟的产量^[10]; ③ 潜在农田产量, 是将现有技术下栽培管理措施应用到最佳所获得的产量^[11]; 产量差一般被定义为作物生产潜力与实际产量的差值, 用来衡量实际产量与理想产量之间的差距。关于耕地生产能力及产量差的研究主要集中在生产能力的计算^[12-14]、影响因素^[15-16]以及缩小产量差的

收稿日期: 2017-06-27; 修订日期: 2018-01-29

基金项目: 国家社科重点项目(14AZD031); 北京市自然科学基金项目(8151001) [Foundation: Key Project of National Social Science Foundation of China, No.14AZD031; Key Project of Natural Science Foundation of Beijing, No.8151001]

作者简介: 雷鸣(1993-), 男, 贵州黔南人, 博士生, 主要从事土地资源可持续利用研究。E-mail: leiming51@126.com

通信作者: 孔祥斌(1969-), 男, 河北承德人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土地资源可持续利用与土地资源评价研究。E-mail: kxb@cau.edu.cn

措施^[17-19], 考虑生态环境问题, 测算耕地可持续生产能力以及利用产量差调整耕地产量的研究较为少见。关于大尺度耕地生产能力及产量差的计算, Foley 已验证了 AEZ 方法 (Agro-Ecological Zoning, 农业生态区) 与区域实验站产量调查相结合, 并通过影响因素逐级修正评估方法的有效性^[20-21]。鉴于此, 本文立足于黄淮海平原区的耕地资源状况, 以水资源为限制条件, 借鉴 AEZ 方法的区划思想, 通过对区域内实验站不同灌溉水平下的产量进行逐级修正, 估算水平衡下黄淮海平原区耕地可持续生产能力, 并与现实产量进行对比计算出可持续产量差, 为黄淮海平原区的地下水超采治理以及耕地休养生息奠定基础。

2 研究区域概况

黄淮海平原区包括京、津、冀、鲁、豫、苏、皖 7 省 (市) 平原地区, 总面积约为 31 万 km², 2015 年耕地面积为 23.3 万 km², 接近全国耕地面积的 1/6, 耕地数量及垦殖率均居全国各一级农区首位, 生产全国近 60%~80% 的小麦和 35%~40% 的玉米, 是中国的粮仓^[22]。依据国家“九五”科技攻关项目“农业资源高效利用与管理技术”中提出的中国农业生态区划方案, 全国划分为 12 个农业生态区、49 个农业生态亚区、105 个农业生态小区^[23-24]。农业生态一级区依据水热条件划分, 农业生态二级区依据农业生态类型组合特征以及中地貌类型组合特征进行细分, 农业生态三级区依据农业生态系统生产力差异、限制因素、中小地貌类型、社会经济技术状况进行细分。黄淮海平原区作为全国 12 个农业生态一级区之一, 分成河北平原及淮北平原两个二级区。河北平原二级区包括京津唐平原、黑龙江地区、漳卫河地区、鲁北平原、鲁西平原、豫北平原、太行山北麓平原及太行山南麓平原 8 个农业生态三级区, 淮北平原二级区包括胶西黄泛平原、徐淮低平原、皖北平原及豫东平原 4 个农业生态三级区。农业生态三级区是一个自然条件、社会经济条件相对均一的区域, 有着相同或相似的种植制度, 是计算黄淮海平原区耕地可持续生产能力的基本分区。

3 数据与方法

3.1 数据来源与处理

耕地可持续生产能力估算的基础数据包括实验站数据、耕地数据、水资源数据、土壤数据以及统计数据, 其中实验站数据黄淮海平原区 12 个实验站定位观测与研究数据集^[25]; 耕地数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心 2015 年中国 1:10 万土地覆盖遥感调查与监测数据库^[26]; 水资源数据中地下水采用了全国第二轮地下水评价的成果《中国地下水资源与环境图集》^[27], 地表水可用资源量与降水量数据来自于 2010-2015 年的海河流域水资源公报, 黄河流域水资源公报以及淮河流域水资源公报^[28-30]; 土壤数据来源于第二次全国土地调查南京土壤所提供的 1:100 万土壤数据^[31]; 统计数据包括各县市农业用水量、有效灌溉面积、农作物播种面积及产量, 来源于中国经济与社会发展统计数据库^[32]。

3.2 黄淮海平原区耕地可持续粮食生产能力的内涵

可持续生产能力的本质是在维持生态系统功能的同时满足当代以及未来人类的需求^[33], 耕地的可持续生产能力可认为是在不危害生态环境健康的投入水平下, 一定区域、一定时期内, 由当地的自然资源禀赋条件和当前的技术经济水平决定的栽培管理水平下, 粮食作物或粮食作物组合所能达到的最高产量。黄淮海平原区由于受季风性气候

影响,尤其是北部地区年内降雨量分配不均,主要集中在7月、8月份,生育期降水量严重不足,为保证产量必须过量引用地表水和超量开采地下水,致使河流干涸断流,地下水位大幅度下降,形成严重的地下水漏斗群^[34-35]。在可持续的安全阈值下,黄淮海平原区的地表水资源利用率不能超过70%,地下水资源利用率不能超过80%,而根据实际利用水量资料分析,海河流域地表水资源利用率已达85%,地下水资源利用率已超过90%,都已处于超负荷运行状态^[36]。目前已形成了总面积达4.1万 km²的浅层地下水漏斗区,5.6万 km²深层地下水漏斗区^[37]。黄淮海平原区耕地可持续生产的首要问题就是水资源能否可持续利用,所以黄淮海平原区耕地可持续生产能力就可以定义为:水资源补给量与开采量基本达到平衡条件时,黄淮海平原区耕地资源在目前先进灌溉管理制度和确定的农业灌溉用水量限制下,粮食作物或粮食作物组合所能达到的最高产量。

3.3 耕地可持续生产能力计算

借鉴AEZ法中农业生态区划的思想,将黄淮海平原区划分为多个自然条件、社会经济条件相对均一农业生态类型区,并依据不同农业生态类型区内近5年不同灌溉水平下具有代表性的实验站粮食作物品种试验,采用等同或略高于当地大田生产的投入管理水平所实现的作物品种产量,作为一定农业生态类型区内农业作物的可实现单产能力,然后逐级对影响作物产量形成的光、温、水、土等因素进行修正,估算出农业生态小区耕地可持续生产能力。

3.3.1 农业生态分区与种植制度确定

通过收集整理黄淮海平原区内农业实验站点关于高产节水的粮食作物数据,按照在每个农业生态区域内,至少1个实验站点的原则,通过筛选比较,最终确定了12个数据完善的实验站(表1,图1)。

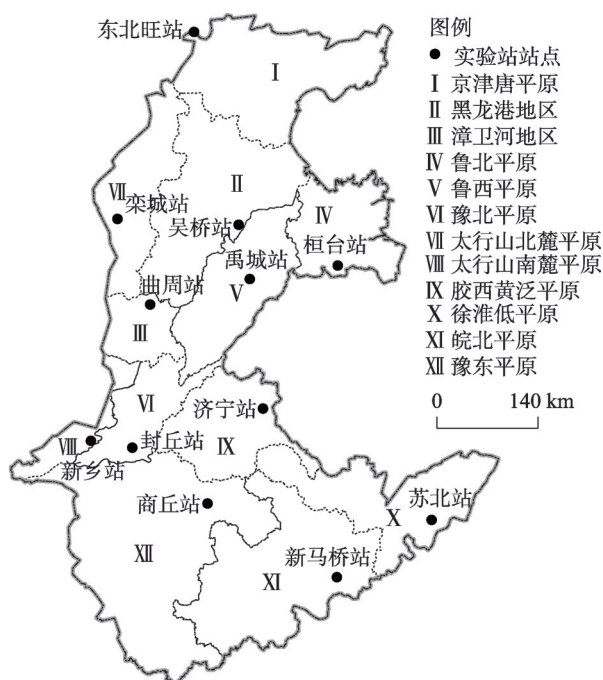


图1 黄淮海平原区示意图

Fig. 1 Location of Huang-Huai-Hai Plain

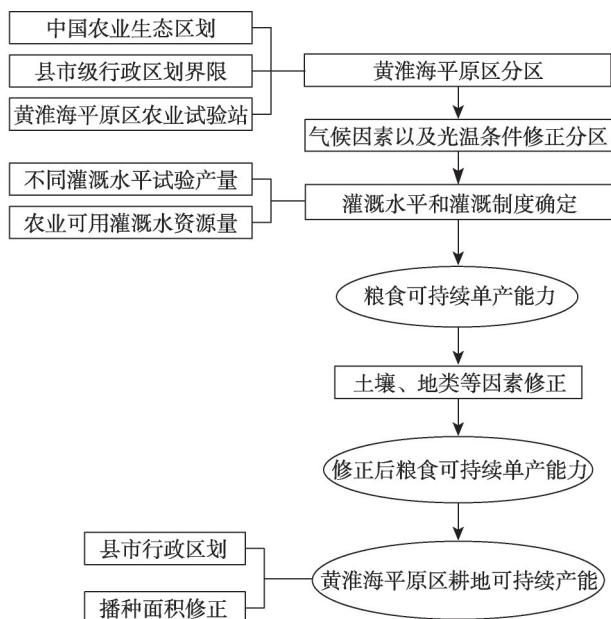


图2 水平衡下耕地可持续生产能力计算流程图

Fig. 2 Flow chart for calculating sustainable grain productivity of arable land under water balance

种植制度是指一个地区或生产单位的作物组成、熟制与种植方式（间作、套种、轮作）的综合^[38]；农业生态分区内种植制度的确定是计算耕地粮食可持续产能的前提。考虑到不同区域的农业用水资源量各有差异，需要根据不同区域的水资源禀赋设定不同的标准种植管理模式，对农业生态三级区进一步细分。通过代表实验站在不同灌溉管理水平下的粮食产量数据集，在农业生态区内部根据农业用水资源量确定种植制度及灌溉管理水平，形成农业生态三级区内部更为精细的单产计算单元。

3.3.2 农业灌溉可用水资源量的确定

水资源可利用总量是在统筹生活、生

产、生态环境用水基础上，通过经济合理、技术可行的措施在当地水资源量中可资一次性利用的最大水量^[39]。农业灌溉可用水资源量是黄淮海平原区粮食可持续生产的基础，对于黄淮海平原区尤其是河北平原深层地下水的资源属性的判定，直接关系到可持续水资源可用量的计算。由于深层地下水的年平均更新强度小于0.12%^[40]，更新相对缓慢，而且深层地下水作为重要的战略资源，不宜作为灌溉水源。所以，本文采用的可持续地下水开采量中不包含深层地下水资源，关于农业灌溉可用水资源量的计算按照如下公式进行：

$$W_{\text{农业灌溉可用总量}} = W_{\text{地表水可利用量}} + W_{\text{地下水可开采量}} \times k - W_{\text{重复量}} \quad (1)$$

$$W_{\text{重复量}} = \rho \times W_{\text{入渗量}} \quad (2)$$

农业灌溉可用水资源量的估算是地表水资源可利用量与浅层地下水资源可开采量的农业用水相加再扣除两者之间的重复计算量，其中 k 是农业地下水用水比例， ρ 为可开采系数，是地下水资源可开采量与地下水资源量的比值。

3.3.3 逐级修正方法 为了计算结果更贴近现实粮食单产，大多数研究采用逐级修正法进行耕地生产能力的研究^[41-42]。依据作物生产力形成的机理、作物能量转化及粮食生产形成过程，考虑光、温、水、土等自然因子以及灌溉、耕作等生产条件因子，逐步衰减估算耕地可持续单产能力，可用下式表达：

$$Y_s = Y_l \times f(N) \times f(W) \times f(S) \times f(M) \quad (3)$$

式中： Y_s 为可持续粮食单产； Y_l 为农业灌溉可用水资源量下的产量； $f(N)$ 为光温生产潜力有效系数； $f(W)$ 为水分有效系数； $f(S)$ 为土壤有效系数； $f(M)$ 为社会有效系数，主要是灌溉条件。由于是以农业生态分区中农业实验站点的限水灌溉产量作为逐级修正的基础，农业生态分区已经考虑区域光温生产潜力以及降水量的差异，各个农业生态分区的内部差异主要是土壤条件以及基础设施水平。所以，黄淮海平原区可持续粮食单产主要通过对实验室站点的限水灌溉产量进行土壤有效系数以及社会有效系数修正。

3.3.4 熵值法 在逐级修正方法中，有效系数计算的过程涉及的因子众多，如土壤有效系数 $f(S)$ 受到生物、物理以及化学性质的影响，各个性质在土壤内部对作物生产力的贡献

表1 黄淮海平原区分区和实验站的确定结果

Tab. 1 Results of spatial division and agricultural experiment station in Huang-Huai-Hai Plain

二级区	三级区	代表实验站
河北平原	京津唐平原	东北旺站
	黑龙港地区	吴桥站
	漳卫河地区	曲周站
	鲁北平原	桓台站
	鲁西平原	禹城站
	豫北平原	封丘站
	太行山北麓平原	栾城站
	太行山南麓平原	新乡站
	胶西黄泛平原	济宁站
	徐淮低平原	苏北站
淮北平原	皖北平原	新马桥站
	豫东平原	商丘站

度不同。所以,在测算有效系数时需要综合考虑不同因子的影响,计算出不同因子的影响权重。多指标赋值的常用方法有主成分分析法、因子分析法、复相关系数法、变异系数法、专家经验法等,而基于信息熵理论的熵值赋权法根据评价指标的变异信息量确定权数,相对传统的主客观赋权法而言,更真实的反映系统内部各因子间携带的信息量,评价结果也更加科学合理^[43]。熵值法设有 m 项影响因子, n 个年份形成原始数矩阵 $X=(x_{ij})_{m \times n}$, 对于某项因子 x_j , 若因子值 x_{ij} 之间的离散程度越大,信息熵就越大,该项因子权重也应越大;反之,信息熵就越小,该项因子权重也就越小。本文采用熵值法确定有效系数中多因子的权重,可以有效克服多因子变量间信息的重叠和人为确定权重的主观性^[44]。

3.4 耕地可持续产量差计算

3.4.1 单产产量差 根据产量差定义,耕地可持续产量差 YG_S 是耕地可持续生产能力 Y_S 与实际产量 Y_R 的差(公式(4))。因为黄淮海平原区可持续生产能力是基于水资源平衡,可认为黄淮海平原区的可持续生产能力是通过“以水定产”,所以耕地可持续产量差 YG_S 还出现负值(图3)。若产量差 $YG_S \leq 0$, 表明耕地实际产量大于该地区水资源平衡下的可持续生产能力,耕地的利用强度超过了该区域的水资源承载力出现超采,需要进行利用强度调整;若产量差 $YG_S \geq 0$, 可认为该地区实际产量小于水资源平衡下的可持续生产能力,有一定的增产潜力。

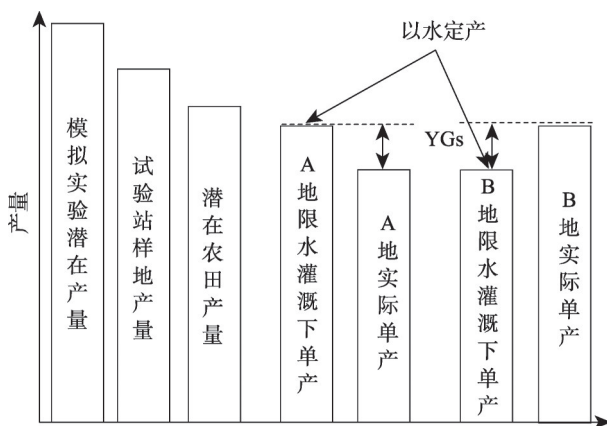


图3 黄淮海平原区耕地可持续产量差概念图

Fig. 3 Concept map for sustainable yield gap of arable land in Huang-Huai-Hai Plain

$$YG_S = Y_S - Y_R \quad (4)$$

3.4.2 总产产量差 为了更加全面地刻画水资源限制下的耕地可持续生产能力,在耕地可持续单产的基础上,对区域内耕地可持续总产汇总。由于不能确定实际中每个地块采用何种熟制以及种植何种作物,因此在假设所有适宜耕种的耕地都种植作物 i 的基础上,通过作物 i 播种面积占耕地总面积的比例得到修正系数,最后得到县市可持续总产以及可持续总产产量差。具体公式如下:

$$\alpha_{ij} = \frac{A_{Gij}}{A_{Pi}} \times 100\% \quad (5)$$

$$TY_{Si} = \alpha_i \cdot \sum_{j=1}^n Y_{Sij} \quad (6)$$

$$TYG_{Si} = TY_{Si} - TY_{Ri} \quad (7)$$

式中: α_{ij} 表示 i 县市内 j 作物修正系数; A_{Gij} 表示该县市 j 作物播种面积; A_{Pi} 表示该县市的耕地总面积; TY_{Si} 是县市内 i 作物的可持续总产; α_i 表示该县市的 j 作物修正系数; Y_{Sij} 表示 i 作物在第 j 评价单元的可持续单产; n 表县市内评价单元的个数。根据式(7)计算出县市内的可持续总产 TY_{Si} , 那么县市内 i 作物的可持续总产产量差 TYG_{Si} 可通过可持续总产 TY_{Si} 与实际总产 TY_{Ri} 相减而得。

4 结果与分析

4.1 水平衡下粮食单产能力计算

4.1.1 农业灌溉可用水量计算 黄淮海平原区地下水中微咸水（矿化度为1~3 g/L）资源丰富，虽然微咸水灌溉使得土壤盐分积累会产生压产效应，但微咸水灌溉较不灌的产量增加15%~40%^[45-46]。因此，黄淮海平原区的地下水可开采量可认为是浅层地下淡水与微咸水的可开采量。根据各流域以及省市水资源公报上收集的地表水农业使用量，以及《中国地下水资源与环境图集》地下水资源量水量，最后得到农业可持续灌溉用水资源量。黄淮海平原区农业可持续灌溉用水资源量呈现南高北低的情形，其中黄河以北的京津唐平原、黑龙港地区农业可持续灌溉用水资源量小于100 mm，黄河以南的皖北平原、徐淮低平原水资源量均大于100 mm。

4.1.2 种植制度确定 由于农业生态区内农业灌溉可用水资源量不同，需要根据不同区域的水资源禀赋设定不同的标准种植管理模式，对农业生态区进一步细分到评价单元。考虑到黄淮海平原区作为中国重要的小麦产区，在保证水资源可持续利用的前提下，各区域种植制度最大限度的利用光热资源，保证一年两熟，提高资源利用潜力。并在水资源紧缺的情况下，优先保证冬小麦的生产，满足冬小麦的水分需求。此外，灌溉方式的不同会在用水效率上产生差异，尽量在保障数据完整的情况下，选择实验站目前最为先进的灌溉管理制度。通过全面搜集每个农业生态三级区代表实验站不同灌溉制度下的管理水平和产量，采用水资源可用量来确定不同区域种植模式和灌溉制度（表2）。

4.1.3 粮食可持续单产能力计算 在黄淮海平原区农业灌溉可用水量基础上，依据12个农业生态区在不同可用水资源量下的种植制度以及单产能力，得到黄淮海平原区粮食可持续单产能力（图5）。其中冬小麦产量分布的纬度差异明显，可持续单产能力在黄淮海平原区小麦平均生产水平以上（2015年黄淮海平原区小麦平均单产为5948 kg/hm²）的农业生态区主要集中在黄河以南的胶西黄泛平原、皖北平原及徐淮低平原区域；黄淮以北的区域可持续单产能力均在区域平均水平以下，京津唐平原以及黑龙港地区的可持续单产能力水平较低，农业生态区内部分地区已不适应种植冬小麦。对于夏玉米的可持续单产，黄河南北地区差异不大；但由于玉米种植对涝害较为敏感，因而水量丰富的徐淮低平原夏玉米产量偏低。黄河以北的京津唐平原以及黑龙港地区主要采用春玉米种植模式，春玉米平均可持续单产能力为8000 kg/hm²，因为一年一熟的种植模式，略高于夏玉米平均可持续单产能力。

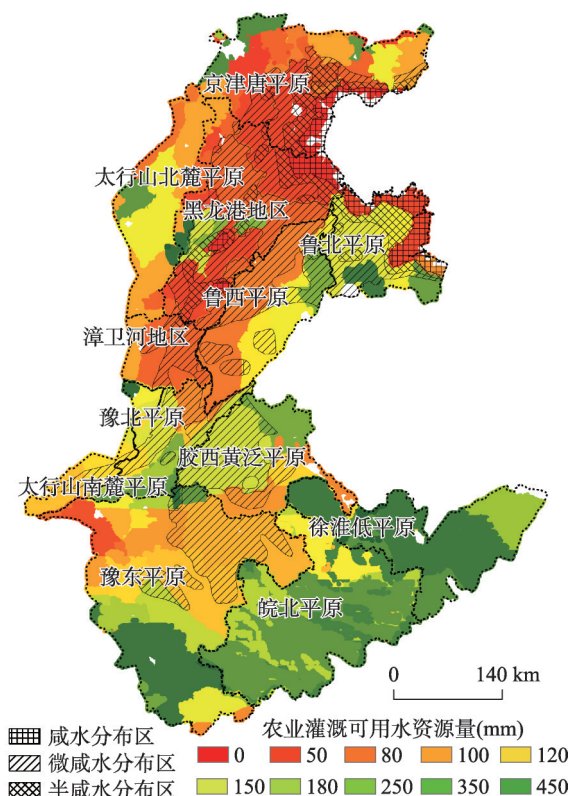


图4 黄淮海平原区农业灌溉可用水量
Fig. 4 Distribution of available water resources
in Huang-Huai-Hai Plain

表2 黄淮海平原区种植与灌溉方式确定依据表

Tab. 2 Basis for the determination of irrigation and planting system in Huang-Huai-Hai Plain

实验站	灌溉方式	种植方式选择(W 为农业灌溉可用水量)
东北旺站	滴灌	$W \geq 250$ mm, 一年两熟, 充分灌溉; $100 \text{ mm} \leq W < 250$ mm, 一年两熟, 限两到三水灌溉; $W < 100$ mm, 一年一熟, 仅浇灌底墒水, 种植一季春玉米。
吴桥站	滴灌	$W \geq 350$ mm, 一年两熟, 充分灌溉; $250 \text{ mm} \leq W < 350$ mm, 一年两熟, 限两到三水灌溉; $120 \text{ mm} \leq W < 250$ mm, 一年两熟, 仅浇灌底墒水; $W < 120$ mm 时, 一年一熟, 仅浇灌底墒水, 种植一季春玉米。
曲周站	滴灌	$W \geq 250$ mm, 一年两熟, 充分灌溉; $100 \text{ mm} \leq W < 250$ mm, 一年两熟, 仅浇灌底墒水; 可用水资源量; $W < 100$ mm, 一年一熟, 仅浇灌底墒水, 种植一季春玉米。
禹城站	畦灌	$W \geq 250$ mm, 一年两熟, 充分灌溉; $180 \text{ mm} \leq W < 250$ mm, 一年两熟, 限两到三水灌溉; $120 \text{ mm} \leq W < 180$ mm, 采用两年三熟模式, 限两到三水灌溉; $W < 120$ mm, 一年一熟, 仅浇灌底墒水, 种植一季春玉米。
桓台站	畦灌	$W \geq 350$ mm, 一年两熟, 充分灌溉; $250 \text{ mm} \leq W < 350$ mm, 一年两熟, 限两到三水灌溉; $100 \text{ mm} \leq W < 250$ mm, 一年两熟, 仅浇灌底墒水; 当可用水资源量 $W < 100$ mm 时, 一年一熟, 仅浇灌底墒水, 种植一季春玉米。
封丘站	滴灌	$W \geq 350$ mm, 一年两熟, 充分灌溉; $250 \text{ mm} \leq W < 350$ mm, 一年两熟, 限两到三水灌溉; $80 \text{ mm} \leq W < 250$ mm, 一年两熟, 仅浇灌底墒水; $W < 80$ mm, 一年一熟, 仅浇灌底墒水, 种植一季春玉米。
栾城站	喷灌	$W \geq 250$ mm, 一年两熟, 充分灌溉; $180 \text{ mm} \leq W < 250$ mm, 一年两熟, 限两到三水灌溉; $80 \text{ mm} \leq W < 180$ mm, 一年两熟, 采用限量灌溉仅一水模式; $W < 80$ mm, 一年一熟, 仅浇灌底墒水, 种植一季春玉米。
新乡站	喷灌	$W \geq 350$ mm, 一年两熟, 充分灌溉; $180 \text{ mm} \leq W < 350$ mm, 一年两熟, 限两到三水灌溉; $100 \text{ mm} \leq W < 180$ mm, 一年两熟, 仅浇灌底墒水; $W < 100$ mm, 一年一熟, 仅浇灌底墒水, 种植一季春玉米。
济宁站	喷灌	水资源基本无限制, 直接比照实验站选择种植模式和管理水平。
苏北站	喷灌	水资源基本无限制, 直接比照实验站选择种植模式和管理水平。
新马桥站	喷灌	$W \geq 250$ mm, 一年两熟, 充分灌溉; $180 \text{ mm} \leq W < 250$ mm, 一年两熟, 限两到三水灌溉; $80 \text{ mm} \leq W < 180$ mm, 一年两熟, 仅浇灌底墒水; $W < 90$ mm, 一年两熟, 雨养模式。
商丘站	畦灌	$W \geq 350$ mm, 一年两熟, 充分灌溉; $100 \text{ mm} \leq W < 350$ mm, 一年两熟, 限两到三水灌溉; $W < 100$ mm, 一年两熟, 仅浇灌底墒水。

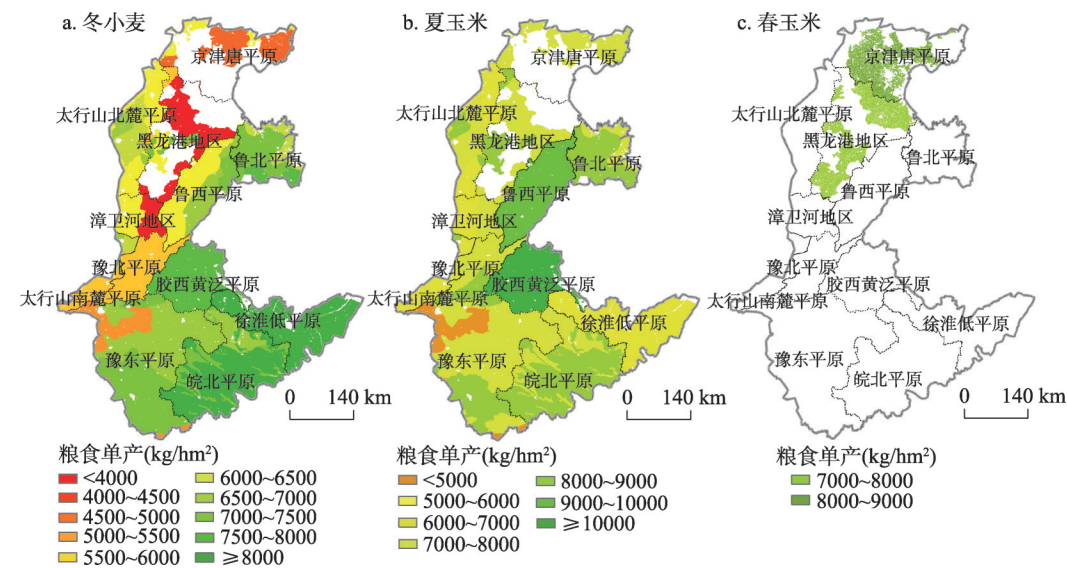


图5 黄淮海平原区粮食可持续单产能力

Fig. 5 Sustainable grain productivity of arable land in Huang-Huai-Hai Plain

4.2 可持续粮食单产能力修正

4.2.1 土壤有效系数修正 耕地粮食生产能力与土壤有着密切的关系，土壤的理化性质及养分丰缺程度是耕地粮食生产的基础。由于粮食生产能力是某个地区一定时期相对稳定的参考值，而时空变异强烈的土壤属性，其性状不稳定，会干扰粮食生产能力的计算，使结果的准确性降低。所以在进行大尺度的土壤修正系数计算过程中，需要考虑土壤的属性性状的时间变异和空间变异特征，作为选择的土壤属性作为粮食生产能力土壤修正系数的计算依据^[47-48]。因此在以往该区域土壤生产潜力研究的基础上，参考土壤学专家的意见以及数据的可获取性，围绕土壤肥力、土壤供肥水平和土壤潜在的供肥能力，本文选取土壤上部有机碳含量1个生物学因素，土壤上部阳离子交换能力、土壤盐基饱和度和、钠碱化量和电导率4个化学性质，土壤上部和下部的黏粒含量、田间持水量、凋萎系数6个物理性质，共同组成了11个因素作为计算土壤修正系数的基础。通过熵值法形成土壤有效系数，对耕地粮食生产能力进行修正。

在确定土壤因素权重的基础上，对耕地评价单元进行计算得到整个黄淮海平原区的土壤修正系数。从图6可以看出，黄淮海平原区绝大部分耕地的土壤修正系数都在0.7以上，修正系数低于0.7的区域分布相对零散，在黑龙港地区、鲁西平原、胶西黄泛平原以及豫东平原等区域土壤修正系数有一定差异，以此土壤修正系数对粮食可持续单产能力进行修正，使其更贴近现实水平。

4.2.2 社会有效系数修正 根据统计年鉴的解释，有效灌溉面积是指在一一定的水源，地块比较平整，灌溉工程或设备已经配套，在一般年景下能够

表3 土壤因素熵值赋权重结果

Tab. 3 The entropy weights of soil factors

指标层	综合指标权重	评价指标	权重
生物性质	0.2295	T_有机碳含量	0.2295
		T_阳离子交换量	0.1037
化学性质	0.4055	T_盐基饱和度	0.1062
		T_部可交换钠盐	0.0812
		T_电导率	0.0553
		T_黏粒含量	0.0709
		S_黏粒含量	0.0704
		T_凋萎系数	0.0704
		S_凋萎系数	0.0705
		T_田间持水量	0.0708
		S_田间持水量	0.0711
物理性质	0.365		

注：根据世界土壤数据库划分，“T_”为上层土壤（0~30 cm），“S_”为下层土壤（30~100 cm）

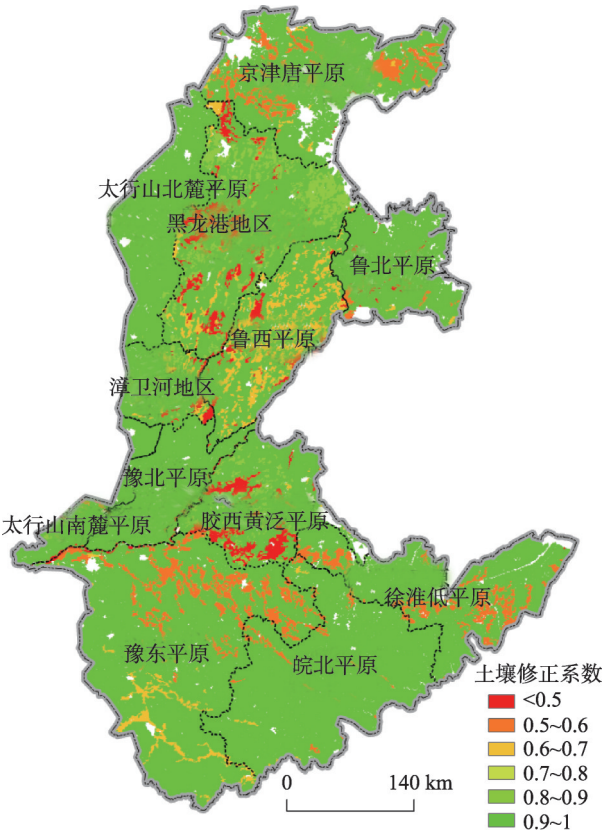


图6 黄淮海平原区土壤修正系数分布

Fig. 6 Spatial distribution map of soil correction coefficient in Huang-Huai-Hai Plain

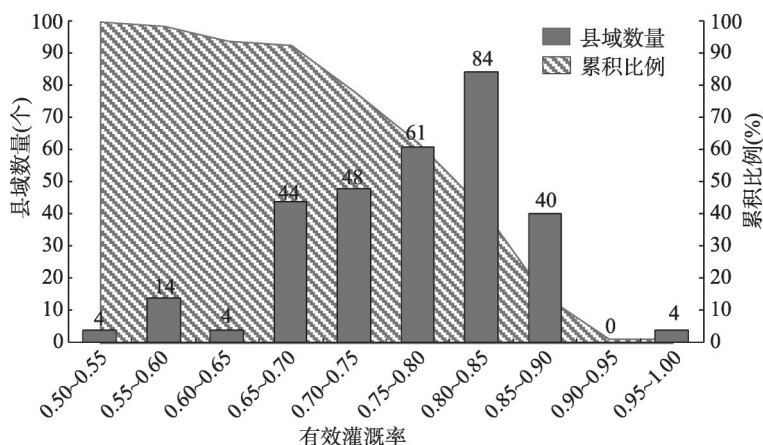
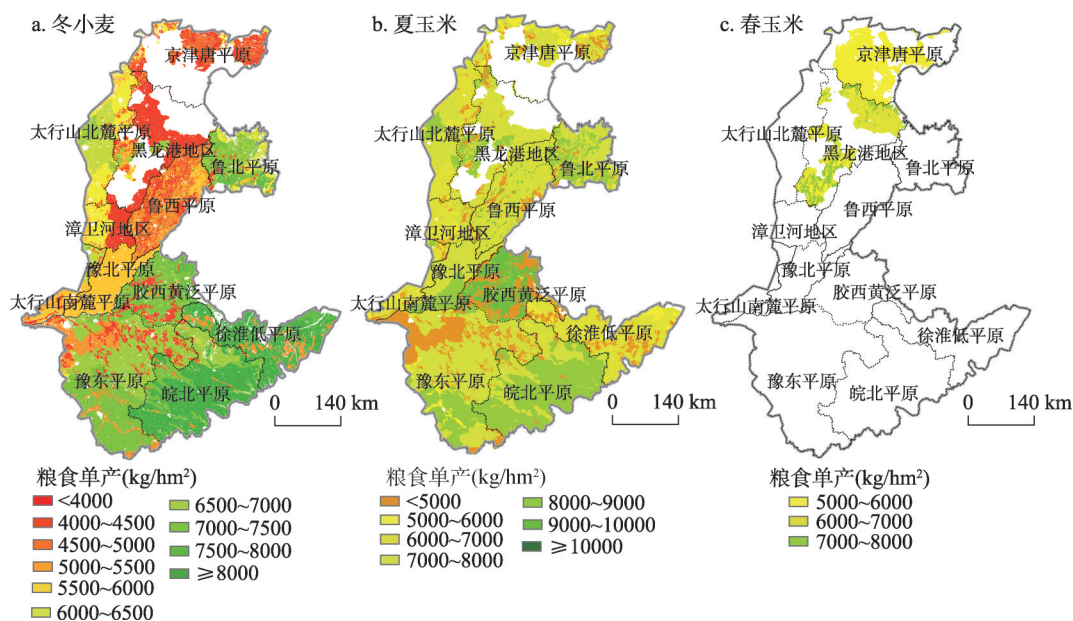


图7 黄淮海平原区有效灌溉率分布

Fig. 7 Effective coefficient of irrigation in Huang-Huai-Hai Plain

进行正常灌溉的耕地面积。有效灌溉率是有效灌溉面积与耕地面积的比值,可以反映区域耕地灌溉基础设施的差异,从而影响耕地产量。因此,将有效灌溉率作为社会有效系数,对生产能力进行修正。采用近5年(2011-2015)的黄淮海平原区303个县市的有效灌溉率的平均值 \bar{I} ($\bar{I} \in [0, 1]$),所有的县市有效灌溉率均在0.5以上,其中分布在0.8~0.85的县市最多,占总县域的27.72%。依据各个县市的有效灌溉率,在土壤因素修正的基础,对黄淮海平原区粮食可持续单产能力进行修正。

4.2.3 可持续粮食单产能力 根据以上修正,可以得到2015年水平衡条件下整个黄淮海平原区修正后的耕地可持续单产水平。相对于未修正的耕地可持续单产能力图,修正后的耕地可持续单产能力在农业生态区内差异显著,更加反映出耕地可持续单产能力的空间变异性(图8)。修正后的冬小麦主要高产区域仍在的胶西黄泛平原、皖北平原和徐淮



低平原区域等黄河以南地区,黄河以南地区小麦的可持续单产仍高于黄河以北地区,黄河以北的京津唐平原南部以及黑龙港地区由于水资源的匮乏,已不适合种植冬小麦;关于夏玉米修正后的可持续单产能力,由于土壤以及有效灌溉率修正,黄河以南的豫东平原、胶西黄泛平原以及徐淮低平原9%耕地面积的夏玉米可持续单产能力降到黄淮海平原区夏玉米平均单产水平以下(2015年黄淮海平原区玉米平均单产为 5597 kg/hm^2),修正后的夏玉米产量更贴近于现实生产水平,同时也说明这些区域土壤条件以及灌溉条件仍有一定的提高空间。修正后春玉米的可持续单产能力空间上差异更为明显,平均可持续单产能力为 7000 kg/hm^2 ,相比修正前减少了 1000 kg/hm^2 。

4.3 产量差计算与分析

4.3.1 单产产量差 本文中单产产量差是修正后耕地可持续单产能力与现实产量的差值,由于缺少实际单产空间数据,以黄淮海平原区各县的粮食单产水平作为县域内现实产量进行对比,得到黄淮海平原区可持续产量差(图9)。冬小麦主要压产区为黑龙港地区、京津唐平原、鲁西平原以及豫东平原,其中黑龙港地区以及京津唐平原的大部分区域单产产量差为负数,绝对值等于实际产量,说明该区域可持续单产为零,不再适合种植冬小麦;而在太行山北麓平原和鲁北平原产量差几乎为0,表明限水灌溉下的产能与现状统计产量基本持平;冬小麦的潜力提升区域主要集中在徐淮低平原、豫东平原以及胶西黄泛平原,冬小麦可持续单产仍有 $1000\sim 3000\text{ kg/hm}^2$ 提升空间。由于统计数据中未作夏玉米和春玉米的区分,所以将修正后的夏玉米与春玉米可持续单产能力进行叠加,并与现实的玉米产量水平进行对比,玉米的压产区域主要集中在太行山南北麓平原以及鲁西北平原,玉米的潜力提升区域主要集中在京津唐平原、胶西黄泛平原以及皖北平原,其中京津唐地区在可持续产能下种植春玉米,仍有 $3000\sim 5000\text{ kg/hm}^2$ 提升空间。

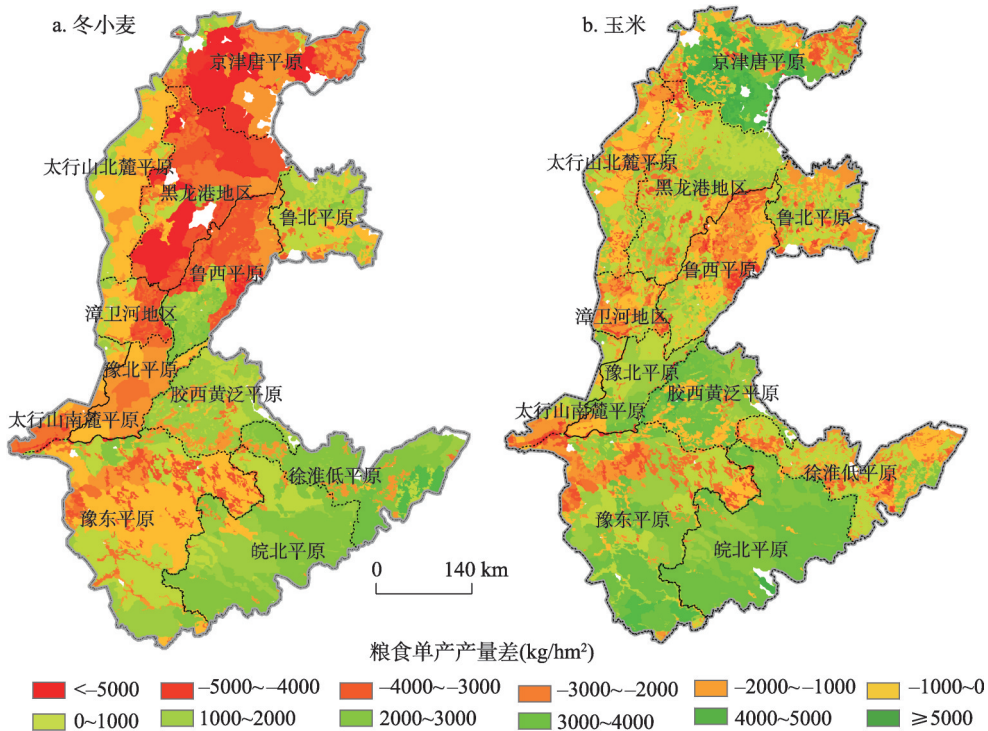


图9 黄淮海平原区可持续单产产量差

Fig. 9 Sustainable yield gap per unit area of arable land in Huang-Huai-Hai Plain

4.3.2 总产产量差 根据作物播种面积修正，得到了可持续粮食总产以及总产产量差。从表4中可以看出，水平衡条件下，黄淮海平原区耕地的可持续粮食生产能力为11640.03万t/年，玉米的生产能力基本能够保证和现状水平持平甚至还会增产，小麦存在331.84万t的压产。黄河以北区域小麦总产产量差主要是负值，其中黑龙港地区压产最多，高达331.39万t，其次是鲁西平原、豫东平原以及京津唐平原，分别压产258.02万t、244.09万t以及114.17万t；增产潜力集中在徐淮低平原、皖北平原以及胶西黄泛平原，分别增产457.88万t、346.70万t和163.32万t；玉米整体增产为263.99万t，主要增产区域为皖北平原、京津唐平原以及胶西黄泛平原，分别增产179.27万t、146.96万t和107.72万t，其中京津唐平原由于水资源限制，将熟制从冬小麦—夏玉米一年两熟改为春玉米一年一熟，熟制的变化使得玉米产量提高，玉米压产区主要集中在太行山南北麓平原以及鲁西北平原，分别压产164.92万t和82.5万t。

表4 黄淮海平原区农业生态区产量差测算结果(万 t)
Tab. 4 Yield gap at the agricultural ecological zones level in Huang-Huai-Hai Plain (10⁴ t)

农业生态三级分区	小麦实际产量	玉米实际产量	小麦可持续产能	玉米可持续产能	小麦产量差	玉米产量差
京津唐平原	209.27	567.21	94.80	714.17	-114.47	146.96
黑龙港地区	514.96	641.59	183.57	652.47	-331.39	10.88
漳卫河地区	222.61	238.58	144.15	182.11	-78.46	-56.47
鲁北平原	229.56	271.88	223.35	229.81	-6.21	-42.07
鲁西平原	647.06	665.80	389.05	625.37	-258.02	-40.43
豫北平原	442.78	206.00	342.24	246.09	-100.54	40.09
太行山北麓平原	500.03	569.65	407.59	454.89	-92.44	-114.76
太行山南麓平原	241.08	205.07	166.96	154.91	-74.12	-50.16
胶西黄泛平原	367.63	332.87	530.95	440.59	163.32	107.72
徐淮低平原	458.72	136.94	916.60	194.59	457.88	57.65
皖北平原	990.00	353.51	1336.70	532.77	346.70	179.27
豫东平原	1809.73	885.34	1565.64	910.66	-244.09	25.33
总计	6633.43	5074.44	6301.60	5338.43	-331.84	264.01

5 讨论

- (1) 微咸水灌溉对于小麦—玉米轮作体系的压产影响与水质矿化度、作物品种、灌溉时间和灌水量密切相关。对于黄淮海平原区主要粮食作物生产的小麦—玉米轮作体系而言，想要测算出浅层微咸水灌溉对于整个黄淮海平原区压产的程度数量和范围并不容易。微咸水长期用于灌溉会导致土壤盐害，容易破坏正常的土壤生态环境，可能带来的环境风险是需要进一步评估和测算的。
- (2) 本文考虑到黄淮海平原区作为中国重要的小麦产区，在保证水资源可持续利用的前提下，各区域种植制度尽量保障冬小麦的种植，最大限度的利用光热资源，保证一年两熟，提高资源利用潜力；同时在水资源紧缺的情况下，优先保证冬小麦的生产，满足冬小麦的水分需求。然而在限水灌溉、耕地休养生息的政策推行后，无法判断各地如何根据目标安排不同的种植模式和作物组合，以及实验站先进灌溉制度与大田种植传统灌溉方式所造成用水效率的差异，均会对结果形成一定的误差。
- (3) 依据本文的测算，小麦总体压产水平为331.84万t，玉米增产水平为264.01万t。

中国近5年(2011-2015)小麦年平均产量为1.23亿t, 占全球小麦产量的17.94%; 若小麦压产331.84万t, 约占国内小麦年均总产的2.68%, 全球小麦年均供给增加量的6.29%, 可以适当考虑通过国际小麦市场购买补充; 另外, 为便于计算, 假定黄淮海平原区均为小麦—玉米种植制度, 但实际皖北平原与徐淮低平原的部分区域种植制度为冬小麦—水稻, 近五年水稻平均产量为104.31万t, 所以实际玉米总产量差应为159.68万t, 仍然不存在产能损失。

6 结论

(1) 从可持续理论和水平衡条件出发, 以水定产, 测算出水平衡条件下黄淮海平原区耕地可持续生产力为11640.03万t/年。

(2) 将黄淮海平原区耕地的可持续粮食生产能力与统计数据代表的现状产量作对比, 得到黄淮海平原区由于限水灌溉造成的粮食产能损失为小麦331.84万t/年, 玉米不存在产能损失, 粮食总产量差为-67.85万t/年。

(3) 小麦主要压产地区为黑龙港地区、鲁西平原、豫东平原以及京津唐平原, 徐淮低平原、豫东平原以及胶西黄泛平原具有一定的提产潜力。黄淮海平原区耕地资源休养生息政策应集中于小麦主要压产地区, 实行适当种植制度调整以及限水灌溉, 同时加强黄淮海平原区南部地区的生产潜力挖掘, 适当考虑全球小麦贸易市场进行产能替代, 维持区域水土资源的可持续利用。

参考文献(References)

- [1] Chen Li, Hao Jinmin, Ai Dong, et al. Balanced yield increasing potential of grain and its spatial differentiation in Huang-Huai-Hai Plain. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(2): 288-297. [陈丽, 郝晋珉, 艾东, 等. 黄淮海平原粮食均衡增产潜力及空间分异. *农业工程学报*, 2015, 31(2): 288-297.]
- [2] Kang Shaozhong. Towards water and food security in China. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 22(8): 880-885. [康绍忠. 水安全与粮食安全. *中国生态农业学报*, 2014, 22(8): 880-885.]
- [3] Zhang Yuanhong, Liu Changquan, Guo Lulai. Evaluation and strategic thinking of China's food security. *China Rural Survey*, 2015(1): 2-14. [张元红, 刘长全, 国鲁来. 中国粮食安全状况评价与战略思考. *中国农村观察*, 2015(1): 2-14.]
- [4] Grafton R Quentin. Addressing China's Water scarcity: Recommendations for selected water resource management issues. *Asian-Pacific Economic Literature*, 2009, 23(2): 124-125.
- [5] Yu Chaoqing, Gong Peng, Yin Yongyuan. China's water crisis needs more than words. *Nature*, 2011, 470(7334): 307.
- [6] Chen Li, Hao Jinmin, Ai Dong et al. Comprehensive index model building of cultivated land yield and productivity based on improved agri-ecological zoning method. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(20): 268-276. [陈丽, 郝晋珉, 艾东, 等. 基于改进农业生态区划法的耕地综合量能指数模型构建. *农业工程学报*, 2014, 30(20): 268-276.]
- [7] Zhang Fengrong, Zhang Jinke, Zhang Di, et al. Change of potential grain productivity of cultivated land from 1996 to 2004 in China. *China Land Science*, 2006, 20(2): 8-14. [张凤荣, 张晋科, 张迪, 等. 1996-2004年中国耕地的粮食生产能力变化研究. *中国土地科学*, 2006, 20(2): 8-14.]
- [8] Yang Xiaoguang, Liu Zhijuan. Advances in Research on Crop Yield Gaps. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(14): 2731-2741. [杨晓光, 刘志娟. 作物产量差研究进展. *中国农业科学*, 2014, 47(14): 2731-2741.]
- [9] Chadwick D J, Marsh J. The Ecological Background of Food Production. *Ciba Foundation Symposia*, 1993: 2-29.
- [10] Lobell David B, Cassman Kenneth G, Field Christopher B. Crop yield gaps: Their importance, magnitudes, and causes. *Annual Review of Environment and Resources*, 2009, 34(1): 179-204.
- [11] FAO. Rice and Narrowing the Yield Gap: The Expert Consultation on Yield Gap and Productivity Decline in Rice Production. Rome Italy, 2004.
- [12] Neumann Kathleen, Verburg Peter H, Stehfest Elke, et al. The yield gap of global grain production: A spatial analysis.

- Agricultural Systems, 2010, 103(5): 316-326.
- [13] Wang Chunzhi, Yu Zhenrong, Xin Jingfeng, et al. Yield gap estimation by combining remote sensing and crop growth model. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(7): 84-89. [王纯枝, 宇振荣, 辛景峰, 等. 基于遥感和作物生长模型的作物产量差估测. 农业工程学报, 2005, 21(7): 84-89.]
- [14] Bhatia V S, Singh Piara, Wani S P, et al. Analysis of potential yields and yield gaps of rainfed soybean in India using CROPGRO-Soybean model. Agricultural and Forest Meteorology, 2008, 148(8/9): 1252-1265.
- [15] Rockstrom J, Falkenmark M. Semiarid crop production from a hydrological perspective: Gap between potential and actual yields. Critical Reviews in Plant Sciences, 2000, 19(4): 319-346.
- [16] Wang Baoliang, Pan Xianzhang, Liang Yin, et al. The potential response of wheat yield to regional climate change and meteorological factors in the arid plain north of the Weihe River. Agricultural Research in the Arid Areas, 2010(1): 227-232. [王宝良, 潘贤章, 梁音, 等. 渭北旱原区域气候变化及其对冬小麦产量的潜在影响. 干旱地区农业研究, 2010 (1): 227-232.]
- [17] Mueller Nathaniel D, Gerber James S, Johnston Matt, et al. Closing yield gaps through nutrient and water management. Nature, 2012, 490(7419): 254-257.
- [18] Wang Jing, Wang Enli, Yang Xiaoguang, et al. Increased yield potential of wheat-maize cropping system in the North China Plain by climate change adaptation. Climatic Change, 2012, 113(3/4): 825-840.
- [19] Liu Zhijuan, Yang Xiaoguang, Hubbard Kenneth G, et al. Maize potential yields and yield gaps in the changing climate of northeast China. Global Change Biology, 2012, 18(11): 3441-3454.
- [20] Foley Jonathan A, Ramankutty Navin, Brauman Kate A, et al. Solutions for a cultivated planet. Nature, 2011, 478 (7369): 337-342.
- [21] Licker Rachel, Johnston Matt, Foley Jonathan A, et al. Mind the gap: How do climate and agricultural management explain the 'yield gap' of croplands around the world. Global Ecology and Biogeography, 2010, 19(6): 769-782.
- [22] Zhang Xueliang, Kong Xiangbin. Cropland sustainable use impacted by groundwater depletion in China's HHH Plains. China Land Science, 2014(5): 90-96. [张雪靓, 孔祥斌. 黄淮海平原地下水危机下的耕地资源可持续利用. 中国土地科学, 2014(5): 90-96.]
- [23] Zhang Jinke, et al. The grain potential of cultivated lands in Mainland China in 2004. Land Use Policy, 2009, 26(1): 68-76.
- [24] Chen Baiming. Regionalization of Land Use and Ecology in China. Beijing: China Meteorological Press, 2003. [陈百明. 中国土地利用与生态特征区划. 北京: 气象出版社, 2003.]
- [25] Sun Honglie, Yu Guirui, Ouyang Zhu, et al. Data Set of China's Ecological System Positioning Observation and Research. Beijing: China Agriculture Press, 2010. [孙洪烈, 于贵瑞, 欧阳竹, 等. 中国生态系统定位观测与研究数据集. 北京: 中国农业出版社, 2010.]
- [26] Resources and Environment Science Data Center, Chinese Academy of Sciences. Land-use data. (2012-02-20) [2016.06.06]. www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=95. [中国科学院资源环境科学数据中心. 土地利用数据. (2012-02-20)[2016.06.06]. www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=95.]
- [27] Zhang Zonghu, Li Lierong. The Atlas of Groundwater Resources and Environment of China. Beijing: Sino Map Press, 2004. [张宗祜, 李烈荣. 中国地下水资源与环境图集. 北京: 中国地图出版社, 2004.]
- [28] Haihe River Conservancy Commission of Ministry of Water Resources. Water Resources Bulletin of Haihe River Basin. (2011-04-01) [2016.12.06]. <http://www.hwcc.gov.cn/hwcc/wwgj/xxgb/>. [水利部海河水利委员会. 海河流域水资源公报. (2011-04-01) [2016.06.06]. <http://www.hwcc.gov.cn/hwcc/wwgj/xxgb/>.]
- [29] Yellow River Conservancy Commission of Ministry of Water Resources. Water Resources Bulletin of Yellow River Basin. (2011-04-01) [2016.06.06]. <http://www.yellowriver.gov.cn/other/hhgb/>. [水利部黄河水利委员会. 黄河流域水资源公报. (2011-04-01) [2016.06.06]. <http://www.yellowriver.gov.cn/other/hhgb/>.]
- [30] Huaihe River Conservancy Commission of Ministry of Water Resources. Water Resources Bulletin of Huaihe River Basin. (2011-04-01) [2016.06.06]. <http://szy.hrc.gov.cn/SystemPortal/Portal/Main/Index.aspx?ID=9>. [水利部淮河水利委员会. 淮河流域水资源公报. (2011-04-01) [2016.06.06]. <http://szy.hrc.gov.cn/SystemPortal/Portal/Main/Index.aspx?ID=9>.]
- [31] Institute of Soil Science in Chinese Academy of Sciences. Survey Soil Data Set in the Second National Land. (2015-01-15) [2016.06.06]. <http://westdc.westgis.ac.cn/data/611f7d50-b419-4d14-b4dd-4a944b141175>. [中国科学院南京土壤研究所. 第二次全国土地调查土壤数据集. (2015-01-15) [2016.06.06]. <http://westdc.westgis.ac.cn/data/611f7d50-b419-4d14-b4dd-4a944b141175>.]

- 4d14-b4dd-4a944b141175.]
- [32] 中国经济与社会发展统计数据库. 县市统计年鉴[EB/OL]. (2011-12-01) [2016.06.06]. <http://tongji.cnki.net/kns55/Navi/HomePage.aspx?id=N2016030043&name=YXSKU&floor=1>. [China Economic and Social Development Statistical Database. Counties Statistical Yearbook [EB/OL]. (2011-12-01) [2016-06-06]. <http://tongji.cnki.net/kns55/Navi/HomePage.aspx?id=N2016030043&name=YXSKU&floor=1>.]
- [33] FAO. Building a Common Vision for Sustainable Food and Agriculture: Principles and Approaches, 2014: 50.
- [34] Liu, Changming, Yu Jingjie, Eloise Kendy. Groundwater exploitation and its impact on the environment in the North China Plain. *Water International*, 2001, 26(2): 265-272.
- [35] Shu Yunqiao, Karen G Villholth, Karsten H, et al. Integrated hydrological modeling of the North China Plain: Options for sustainable groundwater use in the alluvial plain of Mt. Taihang. *Journal of Hydrology*, 2012, 464(5): 79-93.
- [36] Zhang Zhongxue, Yu Guirui. Countermeasures on sustainable utilization of agricultural water resources in high yield grain area in North China study in Huantai County, Shandong Province. *Resources Science*, 2002, 24(1): 68-71. [张忠学, 于贵瑞. 华北高产粮区农用水资源可持续利用对策研究: 以山东省桓台县为例. *资源科学*, 2002, 24(1): 68-71.]
- [37] Xia Jun. Water cycle and water resources security: Problems and challenges in North China. *Progress in Geography*, 2002, 21(6): 517-526. [夏军. 华北地区水循环与水资源安全: 问题与挑战. *地理科学进展*, 2002, 21(6): 517-526.]
- [38] Liu Xunhao. Farming system and farming system regional planning in China. *Journal of China Agricultural Resources and Regional Planning*, 2002, 23(5): 14-18. [刘巽浩. 农作制与中国农作制区划. *中国农业资源与区划*, 2002, 23(5): 14-18.]
- [39] Wang Jiansheng, Zhong Huaping, Geng Leihua, et al. Available water resources in China. *Advances in Water Science*, 2006, 17(4): 549-553. [王建生, 钟华平, 耿雷华, 等. 水资源可利用量计算. *水科学进展*, 2006, 17(4): 549-553.]
- [40] Chen Zongyu, Gao Hongqiang, Wei Wen, et al. Confined aquifer in North China Plain. *Resources Science*, 2009, 31(3): 388-393. [陈宗宇, 郜洪强, 卫文, 等. 华北平原深层地下水的更新与资源属性. *资源科学*, 2009, 31(3): 388-393.]
- [41] Chen Baiming. On the comprehensive productive capacity and food security of future agricultural resources in China. *Geographical Research*, 2002, 21(3): 294-304. [陈百明. 未来中国的农业资源综合生产能力与食物保障. *地理研究*, 2002, 21(3): 294-304.]
- [42] Han Rongqing, Zheng Du, Dai Erfu, et al. Response of production potential to climate fluctuation in major grain regions of China. *Resources Science*, 2014, 36(12): 2611-2623. [韩荣青, 郑度, 戴尔阜, 等. 中国粮食主产区生产潜力对气候波动响应研究. *资源科学*, 2014, 36(12): 2611-2623.]
- [43] Shannon C E. A mathematical theory of communication. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 2001, 5(1): 3-55.
- [44] Cheng Qiyue. Structure entropy weight method to confirm the weight of evaluating index. *Systems Engineering: Theory & Practice*, 2010, 30(7): 1225-1228. [程启月. 评测指标权重确定的结构熵权法. *系统工程理论与实践*, 2010, 30(7): 1225-1228.]
- [45] Chen Suying, Zhang Xiyang, Shao Liwei, et al. Effect of deficit irrigation with brackish water on growth and yield of winter wheat and summer maize. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(3): 579-585. [陈素英, 张喜英, 邵立威, 等. 微咸水非充分灌溉对冬小麦生长发育及夏玉米产量的影响. *中国生态农业学报*, 2011, 19(3): 579-585.]
- [46] Cao Caiyun, Zheng Chunlian, Li Kejiang, et al. Impact of saline water irrigation with different salinities on yield and physiological indices of wheat. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(3): 347-355. [曹彩云, 郑春莲, 李科江, 等. 不同矿化度咸水灌溉对小麦产量和生理特性的影响. *中国生态农业学报*, 2013, 21(3): 347-355.]
- [47] Chen Shuren, Xiao Weizhong, Zhu Yunkai, et al. Spatial variability and correlation of soil nutrient and wheat yield. *Transactions of The Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2008, 39(10): 140-143. [陈树人, 肖伟中, 朱云开, 等. 土壤养分和小麦产量空间变异性与相关性分析. *农业机械学报*, 2008, 39(10): 140-143.]
- [48] Zhang Beier, Huang Biao, Zhang Xiaoguang, et al. Evaluation of soil fertility quality variation during past 30 years in a major grain-producing region of the North China Plain: A case study of Yucheng County. *Soils*, 2012, 44(3): 381-388. [张贝尔, 黄标, 张晓光, 等. 近30年华北平原粮食主产区土壤肥力质量时空演变分析: 以山东禹城市为例. *土壤*, 2012, 44(3): 381-388.]

Estimation of sustainable grain productivity for arable land under water balance in the Huang-Huai-Hai Plain

LEI Ming^{1,2}, KONG Xiangbin^{1,2}, WANG Jianing^{1,2}

(1. College of Resources and Environment, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. Key Laboratory for Farmland Quality and Monitoring of the Ministry of Land and Resources, Beijing 100193, China)

Abstract: China puts forward the national strategy of fallow plan so as to improve the sustainable grain production capacity of arable land and alleviate the continuous decline of the groundwater level in the Huang-Huai-Hai Plain. Aiming at estimation of sustainable grain productivity for ensuring the implementation of this strategy, this paper learns management experience and experimental production from agricultural experiment station and adopts step-by-step correction method in twelve agricultural ecological zones, which are relatively uniform in social and economic conditions based on the sustainable theory and water balance. The results showed that: (1) The total sustainable grain production capacity of arable land under water balance in the Huang-Huai-Hai Plain was 116 million t/year. (2) The yield gap of sustainable grain productivity was -0.67 million t/year, the wheat yield gap was -3.31 million t/year due to limited-water irrigation and the maize yield gap was positive. (3) The loss area of wheat production is mainly distributed in Heilonggang area, Luxi Plain, the Beijing-Tianjin-Tangshan Plain and the eastern Henan Plain, and the potential area is mainly in Xuhuai Plain, the Northern Anhui Plain and Jiaoxi Yellow River Flood Plain. The research was valuable for understanding the sustainable productivity of cultivated land and implementing the reliable spatial pattern of agricultural production in the Huang-Huai-Hai Plain.

Keywords: water balance; sustainable grain productivity; yield gap; Huang-Huai-Hai Plain