文章编号:1000-7601(2019)03-0096-08

doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2019.03.12

基于 GIS 和迈阿密模型的全球灌溉需水量计算

梁书民1,于智媛2

(1. 中国农业科学院农业经济与发展研究所,北京 100081;2.中国财政科学研究院,北京 100142)

摘 要:通过计算光温生产潜力、气候生产潜力、光温潜力需水量、灌溉需水量以及衍生的可持续垦殖率指标, 以解决农业生产潜力、农田熟制、灌溉定额、宜农荒地垦殖适宜性评价等农业发展问题。以迈阿密模型为理论基础, 利用 GIS 空间分析的研究方法,计算出了上述指标的高精度全球分布场,得出全球光温生产潜力为2260×10⁸ t 干物 质,气候生产潜力为1253×10⁸ t 干物质,灌溉需水量总计为12441 km³。主要结论有:热带雨林区除外,全球气候生 产潜力高值区同当前农业区高度吻合,表明农田气候潜力已经被人类充分利用;在温带地区,可持续覆膜雨养垦殖 率>2/3 的地区适宜开垦宜农荒地,发展雨养农业。根据迈阿密模型计算得出的灌溉需水量可作为制定农田喷灌定 额的重要依据;覆膜滴灌节水效果最佳,可持续覆膜滴灌垦殖率为各种垦殖率中最大值,可作为指导宜农荒地资源 开发和多熟制农业发展的主要指标。

关键词:灌溉需水量;光温生产潜力;气候生产潜力;可持续雨养垦殖率;可持续灌溉垦殖率;迈阿密模型;GIS空间分析

中图分类号:S27 文献标志码:A

Calculation of global irrigation water demand based on GIS and Miami model

LIANG Shu-min¹, YU Zhi-yuan²

(1.Institute of Agricultural Economics and Development, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;
 2.Chinese Academy of Financial Sciences, Beijing 100142, China)

Abstract: The main purpose of this paper is to solve the problems of agricultural development, such as agricultural production potential, farmland ripening system, irrigation quota, and evaluation of the reclamation suitability of agricultural wasteland, by calculating light-temperature production potential, climate production potential, light-temperature potential's water demand, irrigation water demand, and derived sustainable reclamation indexes. Based on the Miami model and GIS spatial analysis, the high precision global distribution field of the above indicators was calculated. The global light-temperature production potential was 226.0 billion tons of dry matter; the climate production potential was 125.3 billion tons of dry matter; and the total irrigation water demand was 12 441 cubic kilometers. The main conclusions were as follows: except for tropical rainforest areas, the high value regions of global climate productivity are highly consistent with the current agricultural areas, indicating that the climate potential of farmland was fully utilized by human beings; reclaiming suitable agricultural wasteland to develop rainfed agriculture to be more than 2/3; the irrigation water requirement calculated according to Miami model can be used as an important basis for formulating the quota of sprinkler irrigation in farmland; and the sustainable reclamation rate of film-mulched drip irrigation is the highest among all kinds of reclamation rates, which can be used as the main index to guide the exploitation of wasteland resources suitable for agriculture and multi-cropping potential in agriculture.

Keywords: irrigation water demand; light-temperature productivity potential; climate productivity potential;

基金项目:中国农业科学院科技创新工程"农业资源环境经济与政策"(ASTIP-IAED-2018-07)

收稿日期:2018-05-14 修回日期:2019-05-10

作者简介:梁书民(1966-),男,河北大名人,研究员,博士,主要从事水资源、经济地理和农业经济学研究。E-mail:liangshumin@ caas.cn 通信作者:于智媛(1987-),女,辽宁本溪人,主要从事农业投资、农业财政政策研究。E-mail:1620911677@qq.com

sustainable rainfall reclamation rate; sustainable irrigation reclamation rate; Miami model; GIS spatial analysis; global farmland

人类对陆地植物生产力的认识和利用起源于 石器时代,考古发现表明,在距今13000~7000 a 的 新石器时代早期,以雨养农业为主的原始农业在中 国已经十分发达。夏代初期成书的《禹贡》根据土 壤特性把中国九州农田按生产力的高低分为9等, 大致体现了当时的土地开发程度和雨养农业生产 力的分布格局。西方对农田生产力的评价起始于 古希腊的亚里士多德,也强调土壤对农作物的决定 作用.后来逐步认识到水和光照是决定植物生长的 主要因素。1840年李比希发现了最低量律,在此后 的生态学研究中,影响植物生长的各种自然因素均 得到了重视。1971年赖斯在系统总结前人的植物 生产力研究成果的基础上,提出了迈阿密模型,利 用全球众多的气象观测和植物生产力测量数据,通 过最小二乘法回归得出了植物生产力同多年平均 气温和多年平均降水量关系的经验公式,并利用经 验公式和李比希定律计算了地球陆地植物的气候 生产力分布图^[1-2]。

近 30 年来迈阿密模型在中国得到了广泛应用。 陈国南[3]利用迈阿密模型计算了我国陆地的年生 物生产量:侯光良^[4]比较了迈阿密模型和筑后模型 对中国的计算结果,刘洪杰^[5]肯定了迈阿密模型的 生态学价值:焦翠翠等^[6]利用迈阿密模型计算了全 球森林生态系统的净初级生产力,李莉^[7]研究了中 亚地区气候生产潜力时空变化特征。利用迈阿密 模型进行的中国区域性研究主要集中在东北、华 北、西北3地区和南方草地,如东北地区的东北全 域、呼伦贝尔草原、西辽河平原和大兴安岭北 部[8-11],华北地区的黄淮海平原、锡林郭勒草原和内 蒙古全域牧草^[12-15],西北地区的伊犁河流域、石羊 河流域、西北全域和宁夏中部等[16-20]以及南方草地 的气候生产力研究^[21]。利用迈阿密模型进行分省 研究的有广东、甘肃、河北、浙江、河南和青 海等[22-27]。

农田是人工生态系统,是地球陆地自然生态系统的组成部分;雨养农田的生产力同自然生态系统的气候生产力相当,灌溉农田的生产力同自然生态系统的光温生产力相当。本文通过研究地球陆地自然生态系统的气候生产力和光温生产力推算农田的最大灌溉增产潜力、光温潜力需水量、光温潜力灌溉需水量、光温潜力自然降水贡献份额等衍生指标,从而为计算农业发展潜力,合理利用水资源,

推广高效节水灌溉技术提供理论依据和技术参数。

1 研究方法

1.1 模型与衍生变量

迈阿密模型使用的基础数据是年平均气温和 年降水量。可用于计算光温生产潜力、气候生产潜 力、光温生产潜力的灌溉需水量和可持续覆膜雨养 垦殖率4项重要指标。这4项指标可用于估算自然 生态系统和农田生态系统的光温生产潜力、气候生 产潜力和灌溉需水量,指导当地依据当年的降水量 制定农田实际灌溉定额,为推广节水灌溉提供理论 依据和定量数据支撑。水资源是农田灌溉的基础, 为研究水资源同灌溉需水量的空间耦合关系,本文 还引入了可持续灌溉垦殖率的概念。

各变量的具体计算方法和公式如下:

(1)光温生产潜力 Y_t 迈阿密模型光温生产潜力 Y_t 通过经验公式计算获得,是年平均气温 t 的经验函数。

Y_t = 3000/[1 + exp(1.315 - 0.119*t*)] (1) 式中, *Y_t* 为光温生产潜力(g・m⁻²); *t* 为年平均气 温(℃)。

(2) 气候生产潜力 Y_{min} 迈阿密模型气候生产 潜力 Y_{min} 是迈阿密模型光温生产潜力 Y_t 和降水生产 潜力 Y_p 的最小值,迈阿密模型降水生产潜力 Y_p 是年 平均降水量 P 的经验函数。

 $Y_p = 3000 \times [1 - \exp(-0.000664 \times P)]$ (2) 式中, Y_p 为降水生产潜力(g·m⁻²);P 为年平均降水 量(mm)。

$$Y_{\min} = \operatorname{Minium}(Y_t, Y_p) \tag{3}$$

式中, Y_{\min} 为气候生产潜力($g \cdot m^{-2}$)。

灌溉增产潜力 Y_{irad} 是光温生产潜力 Y_i 同气候生 产潜力 Y_{min} 的差值。

$$Y_{\rm irad} = Y_t - Y_{\rm min} \tag{4}$$

式中, Y_{irad} 为灌溉增产潜力(g・m⁻²)。

(3) 光温潜力灌溉需水量 P_d 光温潜力需水 量 P_{Y_t} 是降水生产潜力 Y_p 同光温生产潜力 Y_t 相等时 的降水量。光温潜力灌溉需水量 P_d 是降水量 P 同 光温潜力需水量 P_{Y_t} 的差值,该变量的负值代表多余 的降水量。由于喷灌类似于自然降水,光温潜力灌 溉需水量实际即为喷灌需水量。以 P_{Y_t} 替代 P,以 Y_t 替代 Y_p,通过公式(2) 可以推导出光温潜力需水量 P_{Y_t} 与光温潜力 Y_t 的关系式进而得出光温潜力灌溉 $P_{Y_t} = 1506 \times \ln[3000/(3000 - Y_t)]$ (5) 式中, P_{Y_t} 为光温潜力需水量(mm)。

$$P_d = P_{Y_t} - P \tag{6}$$

式中, P_d 为灌溉需水量(mm)。

(4)可持续垦殖率可持续垦殖率包括可持续覆膜雨养垦殖率和可持续灌溉垦殖率,可持续灌溉垦殖率,可持续灌溉垦殖率,可持续灌溉垦殖率、可持续裸地滴灌垦殖率、可持续覆膜喷灌垦殖率、可持续覆膜滴灌垦殖率4种,分述如下。

可持续覆膜雨养垦殖率 *R_{PP_Y}*。可持续覆膜雨 养垦殖率是天然降水量 *P* 同光温生产潜力需水量 *P_y*的比值。

$$R_{PP_{Y_i}} = P/P_{Y_i} \tag{7}$$

在实践中,宽行距地膜覆盖雨养农业有收集雨 水的作用,可以实现可持续覆膜雨养垦殖率。

可持续裸地喷灌垦殖率 $R_{R_{a}P_{d}}$ 。迈阿密模型计 算的灌溉需水量 P_{d} 是喷灌需水量(相当于自然降水)。可持续裸地喷灌垦殖率是本流域的径流深度 R_{o} 同灌溉需水量 P_{d} 的比值。为保持数据的连贯性, 在丰水区,当 P_{d} 为0或负值时, $R_{R_{a}P_{d}}$ 的值应当取为 1,当 $R_{R,P_{d}} > 1$ 时, P_{d} 值应当取为1。

$$R_{R_o} - P_d = R_o / P_d \tag{8}$$

在实践中,裸地喷灌将本地径流集中用于灌溉 部分农田满足灌溉需水量,可以实现可持续裸地喷 灌垦殖率。其中高精度径流分布场可以利用经验 径流系数公式根据干旱指数、地面坡度和多年平均 降水量计算得出^[29]。

可持续裸地滴灌垦殖率 $R_{R_oP_{dtr}}$ 。可持续裸地滴 灌垦殖率 $R_{R_oP_{ddr}}$ 是本流域的径流深度 R_o 同滴灌灌溉 需水量 P_{ddr} 的比值。实践数据表明,滴灌需水量是 喷灌的 62.5%,即同样的供水量下滴灌面积是喷灌面 积的 1.6 倍^[28]。为保持数据的连贯性,在丰水区,当 P_{ddr} 为0或负值时, $R_{R_oP_{ddr}}$ 的值应当取为1,当 $R_{R_oP_{ddr}} >$ 1 时, P_{ddr} 值应当取为1。

 $R_{R_o} - P_{ddr} = R_o / P_{ddr} = 1.6 \times R_o / P_d$ (9) 式中, P_{ddr} 为滴灌灌溉需水量(mm); R_o 为径流深度 (mm); $R_{R_o P_{ddr}}$ 为可持续裸地滴灌垦殖率。

在实践中,裸地滴灌将本地径流集中用于灌溉 部分农田满足灌溉需水量,减少了农田行间蒸发, 可以实现可持续裸地滴灌垦殖率。

可持续覆膜喷灌垦殖率 R_{Pspr}。可持续覆膜喷灌 垦殖率是在地膜覆盖耕作情况下,本流域的降水量 P与径流深度 R_o之和,同光温生产潜力需水量 P_Y,的 比值。

 $R_{P_{spr}} = (R_o + P) / P_{Y_t} \tag{10}$

在实践中,宽行距地膜覆盖喷灌既利用了自然 降水,又利用了本地天然降水产生的径流。

可持续覆膜滴灌垦殖率 R_{Pdrio} 可持续覆膜滴灌 垦殖率是在地膜覆盖耕作情况下,本流域的降水量 P 与径流深度 R_a 之和,同降水量 P 与滴灌需水量 P_{dt} 之和的比值。

$$R_{Pdri} = (R_o + P) / (P + P_{ddr})$$
(11)

在实践中,宽行距地膜覆盖滴灌既利用了自然 降水,又利用了本地天然降水产生的径流,且灌溉 需水量低于喷灌。

1.2 研究方法与步骤

以下为利用 GIS(geographic information system) 格栅数据计算迈阿密模型指标和衍生指标的步骤。

首先,在全球地理投影下用 ARCINFO 的 Grid 模块中的 Resample 命令将 0.00833°的原始全球年 平均降水量和全球年平均气温格栅数据生成分辨 率为 0.1667°的格栅数据。

第二,在 ARCINFO Grid 模块中用 Combine 指令 在地理投影下将 0.1667°地面分辨率的上述 2 组格 栅数据合并为一;在 ARCVIEW 中用 Table Joint 命 令将数据加载到合并后的新格栅表中。

第三,在合并后的格栅数据表格中,利用 ARCVIEW 表格模块,根据上述公式(1)~(7)逐项计 算每个格栅的光温生产潜力 Y_t 、降水生产潜力 Y_p 、气候生产潜力 Y_{min} 、光温生产潜力需水量 P_{Y_t} 、和光温生 产潜力灌溉需水量 P_d ,并计算可持续覆膜雨养垦殖 率 R_{PPy} 。

第四,在 ARCINFO Grid 模块中用 Combine 指令 将上述 0.1667°格栅数据同用经验公式计算的全球 径流深度 0.1667°格栅数据合并,得到含有径流变 量、生产潜力变量和灌溉需水量数据的格栅数据。 在合并后的格栅数据表格中,利用 ARCVIEW 表格 模块,根据上述公式(8)~(11)计算 4 项可持续灌 溉垦殖率。

第五,在 ARCINFO 中利用 GRID 模块中的地图 投影转换子命令,将全球地理投影转换为具有等积 特征的摩尔魏德投影(Mollweide projection)。利用 ARCVIEW 表格模块,依据新投影下各等属性单元 的格栅数量计算各等属性单元的面积。通过等积 投影转换后,0.1667°地面分辨率的格栅边长为 20 496.1 m,面积为 420.09 km²。至此得到的 GRID 格栅数据可用于绘制上述各变量的全球分布地图。 在摩尔魏德投影数据表格中,利用 ARCVIEW 表格 模块,依据各等属性单元的面积和属性值汇总,可 得到各个变量的全球总量数据。

本研究所用的基础数据,全球多年平均降水深度 和平均气温格栅数据来源于美国加利福尼亚大学伯 克利分院的 Hijmans 等^[30]于 2005 年生成的格栅数 据,原始观测数据年份为 1950-2000 年。干旱指数 来源于国际农业研究咨询组空间信息协会 (Consultative Group on International Agricultural Research, Consortium for Spatial Information, CGIAR – CSI)^[31];地面坡度数据来源于 CGIAR – CSI SRTM 90m Database^[32]。

2 运算结果

通过 GIS 运算得出全球光温生产潜力和气候生 产潜力。主要结果是全球陆地(不含南极洲)总面 积为 13 493.7×10⁴ km²;光温生产潜力 Y_t 为2 260.35 ×10⁸ t 干物质;气候生产潜力 Y_{min} 为1 252.99×10⁸ t 干物质,是光温潜力的 55.4%,灌溉增产潜力 Y_{irad} 为 1007.36×10⁸ t,是光温潜力的44.6%。同文献比较表 明,本文估计的全球气候生产潜力同 1972 年 Lieth 估算的陆地生物量 1 245×10⁸ t 十分相近,稍微高于 Lieth 列举的 12 种计算方法的平均值 1 207× 10⁸ t^[11]。

若定义丰水区为灌溉需水量 P_d≤0 的地区,缺 水区为灌溉需水量 P₄>0 的地区,全球丰水区面积 为4153×10⁴ km²,占地球陆地表面积(不含南极洲) 的 30.78%, 该区光温潜力为 290.0×10⁸ t 干物质, 气 候潜力同光温潜力相等,灌溉增产潜力为0,在平水 年不需要灌溉:丰水区降水量大于光温需水量,水 量多余 13 428 km³。全球缺水区面积为9 340×10⁴ km²,占地球陆地表面积(不含南极洲)的 69.22%, 该区光温潜力为1970.3×10⁸t干物质,气候潜力为 963.0×10⁸ t 干物质, 明显低于光温潜力, 仅占光温 潜力的 48.87%;缺水区需要通过灌溉才能实现光温 潜力,灌溉增产潜力为1007.4×10⁸t干物质,高于气 候潜力,是光温潜力的51.13%;缺水区的降水量为 71 966 km³,光温潜力需水量为84 437 km³,总缺水 量为 12 441 km³,是光温潜力需水量 P_{χ} 的 14.73%。 全球降水量为 106 620 km³, 光温需水量为 105 633 km³,多余量为 987 km³,为光温需水量的 0.93%。 但是由于地球水资源分布不均衡,同热量资源匹配 较差。全球(不含南极洲)总径流量47 884 km^{3[29]}, 远远高于缺水区的光温潜力缺水量,是总缺水量的 3.85 倍,但是由于存在地域分布不均问题,径流深 度高的地区大都分布于丰水区或缺水程度较轻的 地区;半干旱区可以利用本地水资源推广高效节水灌溉技术,解决农业发展中遇到的缺水问题;干旱区为严重缺水区,径流量也严重不足,发展灌溉农业需要长距离跨流域调水解决缺水问题。

2.1 光温生产潜力

光温生产潜力主要受地面温度影响,是水分条 件得到满足情况下的自然生态系统的最大生产潜 力。迈阿密模型使用的产量单位是每年生产干物 质量 g · m⁻², 或者为 10 kg · hm⁻²。光温潜力分布 情况是热带的光温潜力值高,两极地区的值低,温 带地区的值居中;在纬度相近的情况下,高海拔地 区的光温潜力值低,低海拔地区的值高。世界主要 农业区的光温潜力一般在 10 000~25 000 kg · hm⁻² 之间;全球光温潜力<10 000 kg · hm⁻²的低值区主 要分布在加拿大、北欧、俄罗斯北部、西伯利亚和远 东、青藏高原、中亚山地、美国的落基山地、南美洲 的安第斯山中南部;光温潜力>25 000 kg · hm⁻²的 高值区主要分布在亚马逊河流域、刚果盆地、撒哈 拉沙漠中南部、非洲赤道附近的低海拔地区、阿拉 伯沙漠中南部、南亚和东南亚低海拔地区、新几内 亚岛、澳大利亚北部。全球 21 片农业区的光温生产 潜力中值在 7 250~26 000 kg · hm⁻²之间, 按8 000 kg·hm⁻²光温潜力可保证农作物一熟计算得出的理 论农作物熟制在 0.91~3.25 之间(图 1)。光温生产 潜力可以用于计算灌溉农田的生产潜力、灌溉草地 的产草量、灌溉人工林的林木蓄积量增量。

2.2 气候生产潜力

自然生态系统的气候生产潜力是自然生态系 统受光温条件和自然降水共同作用的结果。按照 李比希定律,气候潜力在迈阿密模型中取降水生产 潜力和光温生产潜力的最小值。在光温生产潜力 较小的寒带地区,即使降水生产潜力大于光温潜 力,受热量条件限制实际生产潜力也只能是当地的 光温潜力。全球气候生产潜力的分布特点是降水 和温度条件匹配较好的地区气候潜力高,降水和温 度条件匹配差的地区气候潜力低。高值区主要有 赤道附近的热带雨林区,其次是北美大陆东南部、 南美大陆东南部、非洲大陆东南部、澳大利亚东南 部、亚洲大陆东南部、南亚次大陆、中西欧、地中海-黑海沿岸地区、北美洲西部沿海地带。干旱区光温 潜力高,气候潜力决定于降水生产潜力,一般很低, 但是干旱区的山地由于降水量相对高,在雪线以下 一般存在一个气候生产潜力较高的地带,如亚洲的 中亚山地和喜马拉雅山南坡,南美洲的秘鲁山地和 北美洲的落基山地(图2)。

全球旱作农业的分布同温带和亚热带的气候 生产潜力高值区高度吻合,这些地区也是宜农荒地 资源较为丰富的地区,可作为我国未来农业走出去 的主要目的地。热带气候潜力高值区生长有热带 雨林,主要分布于非洲刚果河盆地、东南亚沿海平 原和南美洲亚马逊平原,气候潮湿炎热,不适宜人 类居住,环境保护主义者反对人类对热带雨林的农 业开发,这些地区一般不作为宜农地区。

2.3 光温潜力需水量与可持续覆膜雨养垦殖率

光温潜力需水量同光温生产潜力呈正单调函 数关系,二者空间分布形势十分相似。可持续覆膜 雨养垦殖率是光温潜力需水量中天然降水的贡献 份额,其空间分布形势与灌溉增产潜力的分布形势 互补,数值由湿润区的100%向半湿润区、半干旱区 和干旱区递减,到干旱区一般接近0。该指标描述 了雨养农业对天然降水的可持续利用程度。当前 雨养农业较先进的生产技术是利用沟畦地膜覆盖 收集和保持天然降水来增加产量,通过加宽行距可 以将地面雨水集中于沟畦底部被播种于此的农作 物所利用,利用田间微地形实现局部地带供水增 加,从而使农作物产量得到提高。可持续覆膜雨养 垦殖率越低,地膜覆盖成本越高,旱灾频率越大,经济 效益越差,宜农荒地适宜开发程度越低。一般可持续 覆膜雨养垦殖率在2/3以下则不适宜发展旱作农业。



图 1 全球光温潜力 Y_t 分布图

Fig.1 Distribution of global light and temperature productivity potential, Y_t



图 2 全球气候潜力 Y_{min}分布图 Fig.2 Distribution of global climate productivity potential, Y_{min}

2.4 灌溉需水量与可持续灌溉垦殖率

灌溉需水量同灌溉增产潜力呈正单调函数关 系,二者空间分布形势也十分相似(图3)。由于灌 溉是干旱半干旱区农业发展的主要因素,光温潜力 灌溉需水量可用于评价各种灌溉方式的节水效果。 在各种灌溉方式中,喷灌更接近自然降水,喷灌的 灌溉定额同光温潜力灌溉需水量较为相近;滴灌比 喷灌更节水,滴灌的灌溉定额一般低于光温潜力灌 溉需水量。由于喷灌和滴灌的实际灌水量接近或 低于理论灌溉需水量,所以一般称之为高效节水灌 溉。可持续裸地喷灌垦殖率是本地径流量同光温 潜力灌溉需水量的比值,其分布形势同可持续覆膜 雨养垦殖率相似,但是一般比可持续覆膜雨养垦殖 率低,数值由湿润区的100%向半湿润区、半干旱区 和干旱区快速下降,到半干旱区与干旱区的过渡地 带已经接近0。可持续覆膜滴灌垦殖率是5项可持 续垦殖率的最大值(图4),其分布形势同可持续覆 膜雨养垦殖率相似。

一般情况下 5 项可持续垦殖率数值从大到小的 顺序是:可持续覆膜滴灌垦殖率、可持续覆膜喷灌 垦殖率、可持续覆膜雨养垦殖率、可持续裸地滴灌 垦殖率、可持续裸地喷灌垦殖率。引入可持续灌溉



图 3 全球灌溉需水量 P_d 分布图

Fig.3 Distribution of global irrigation water demand, P_d



图 4 全球可持续覆膜滴灌垦殖率 R_{Pdri}分布图 Fig.4 Distribution of global sustainable land reclaim rate of irrigation, R_{Pdri}

垦殖率概念的意义在于它可以作为干旱半干旱区 在没有外来水源,在利用各种灌溉技术靠抽取本地 地下水灌溉情况下的最大垦殖率,大于该垦殖率就 意味着当地地下水资源被过度开发,地下水位将持 续下降,直到枯竭。可持续覆膜滴灌垦殖率较可持 续裸地喷灌垦殖率的增量,大致可以反映在不进行 跨流域调水情况下宽垄覆膜滴灌较裸地喷灌的节 水效果,可作为宽垄覆膜滴灌技术推广适宜性评价 的主要指标。从全球可持续覆膜滴灌垦殖率较可 持续裸地喷灌垦殖率的增量分布图可见,宽垄覆膜 滴灌技术广泛适宜于在干旱半干旱和半湿润地区 推广,这些地区可持续灌溉垦殖率增量一般>0.1。 全球范围内大面积推广覆膜滴灌灌溉技术,可以使 热带亚热带地区的农作物熟制增加,如热带雨林边 缘地区、美国东南部、印度东南部、中国东南部和中 南半岛;还可以使温带地区的宜农荒地可开垦面积 扩大,如北半球泰加林南缘、南美洲东南部、非洲东 南部和澳大利亚东南部。

3 结论与讨论

迈阿密模型可用于计算光温生产潜力、气候生 产潜力、喷灌需水量和可持续雨养与灌溉垦殖率等 衍生指标,为农业生产和宜农荒地开发提供定量化 指标。本文得出的主要结论为:(1)光温潜力可用 于计算灌溉农田的生产潜力,灌溉需水量可用于制 定喷灌灌溉定额,指导灌溉农田的农业生产实践和 宜农荒地的灌溉农业开发。(2)气候潜力可用于计 算雨养农业的生产潜力,覆膜雨养垦殖率可用于指 导旱作农业的生产实践和宜农荒地的旱作开发。 (3)覆膜滴灌垦殖率在热带亚热带地区可用于指导 多熟制农业生产和当地官农荒地的多熟制农业开 发,在温带地区可用于指导当地的宜农荒地开垦和 一熟制农业区的扩张。(4)水肥一体化覆膜滴灌农 业技术具有增温、保湿、平衡土壤养分三重效果,适 宜于在水分、热量和土壤为限制条件的地区推广, 应用于当地的农业资源开发,开垦宜农荒地,增加 农作物熟制,提供农作物单产,增加全球农产品产 量,保障人类的食物供给。(5)干旱半干旱地区的 农业容易遭受旱灾,宽行距覆膜滴灌可持续灌溉率 是现行灌溉技术下可持续灌溉率的最高值,在旱灾 频繁的干旱半干旱地区大力推广水肥一体化覆膜 滴灌,既可以抗御旱灾,又可以实现水资源可持续 利用,还可以节约化肥,对当地的农业发展十分 有利。

以下问题有待进一步讨论:(1)光温潜力灌溉

需水量是评价灌溉定额的主要指标,具有统一性、 合理性和科学性,应当用于指导农业向高效节水灌 溉发展,最终实现水肥一体化覆膜滴灌的最佳节水 灌溉方式。(2)本文计算的一系列迈阿密模型指标 及延伸指标,可用于全球宜农荒地开发的适宜性评 价,作为中国农业走出去战略中地域选择的参考指 标。(3)在水分条件得到满足的情况下,提高农作 物的经济系数是发挥光温生产潜力,促进农作物增 产的重要途径,应当成为作物育种的重点发展方 向。(4)发展中国家发展节水灌溉的最大障碍是农 田水利设施落后,解决资金短缺问题是关键,应当 利用丰富的耕地资源、宜农荒地资源和水资源以及 巨大的农业发展潜力,吸引国际投资,提高农业生 产技术水平和食物自给率。(5)一带一路地区土地 资源和水资源丰富且开发程度较低,发展高效节水 农业的投资需求巨大,应当是我国农业走出去的主 要地区,如俄罗斯西伯利亚和远东的南部地带、蒙 古和中亚5国、南亚和东南亚地区以及非洲。拉丁 美洲和澳大利亚地区土地资源丰富,具有巨大的农 业发展潜力,也可作为我国国家农业合作的主要目 的地。

参考文献:

- Lieth H. Primary production: Terrestrial ecosystems [J]. Human Ecology, 1973, (4): 303-332.
- [2] 里思 H,惠特克 R H,等.生物圈的第一性生产力[M].王业蘧,等译. 北京:科学出版社,1985:217-232.
- [3] 陈国南.用迈阿密模型测算我国生物生产量的初步尝试[J].自然资源学报,1987,2(3):270-278.
- [4] 侯光良,游松才.用筑后模型估算我国植物气候生产力[J].自然资 源学报,1990,5(1):60-65.
- [5] 刘洪杰.Miami 模型的生态学应用[J].生态科学,1997,16(1):54-57.
- [6] 焦翠翠,于贵瑞,展小云,等.全球森林生态系统净初级生产力的空间格局及其区域特征[J].第四纪研究,2014,34(4):699-709.
- [7] 李莉,周宏飞,包安明.中亚地区气候生产潜力时空变化特征[J].自然资源学报,2014,29(2):285-294.
- [8] 吴正方.东北地区净第一性生产力对气候变暖的响应研究[J].经济 地理,1997,17(4):49-55.
- [9] 赵慧颖,魏学占,乌秋力,等.呼伦贝尔典型草原区牧草气候生产潜 力评估[J].干旱地区农业研究,2008,26(1):137-140,159.
- [10] 梁怀宇,杨恒山,等.1951-2008年西辽河平原玉米气候生产潜力变 化特征分析[J].中国农学通报,2011,27(30):16-20.
- [11] 赵慧颖,田宝星,宫丽娟,等.近 308 年来大兴安岭北部森林植被气候生产潜力及其对气候变化的响应[J].生态学报,2017,37(6): 1900-1911.
- [12] 王婧,逢焕成,任天志,等.黄淮海地区主栽作物水分供需平衡分析[J].灌溉排水学报,2010,29(5):106-109.
- [13] 黄川容,刘洪.气候变化对黄淮海平原冬小麦与夏玉米生产潜力的 影响[J].中国农业气象,2011,32(增1);118-123.
- [14] 曹立国,刘普幸,张克新,等.锡林郭勒盟草地对气候变化的响应及

其空间差异分析[J].干旱区研究,2011,28(5):789-794.

- [15] 李夏子,郭春燕,杨晶,等.气候变化对内蒙古牧草生产潜力的影响 [J].中国农学通报,2018,34(16):106-114.
- [16] 孙慧兰,李卫红,徐远杰,等.新疆伊犁河流域牧草气候生产潜力的 时空变化特征分析[J].草业学报,2010,19(6):555-61.
- [17] 窦立宝,郭玉刚.基于 GIS 的石羊河流域气候生产潜力估算[J].人 民黄河,2011,33(7):56-58.
- [18] 程曼,王让会,薛红喜,等.干旱对我国西北地区生态系统净初级生产力的影响[J].干旱区资源与环境,2012,26(6):1-7.
- [19] 马甜,王俊波,张治华,等.宁夏中部干旱带天然草地气候生产潜力研究[J].草地学报,2013,21(2):237-242.
- [20] 李子龙,田明静.银川市气候资源生产潜力研究[J].农业科学研究,2017,38(1):53-56.
- [21] 孙成明,陈瑛瑛,武威,等.基于气候生产力模型的中国南方草地 NPP 空间分布格局研究[J].扬州大学学报(农业与生命科学版), 2013,34(4):56-61.
- [22] 郭志华,李琼婵.广东省植被潜在生产力的估算及其分布[J].热带 亚热带植物学报,1997,5(1):45-52.
- [23] 牛叔文.甘肃第一性生产潜力的地区分布及开发利用初探[J].甘 肃科学学报,1994,(4):6-10.
- [24] 康西言,马辉杰.河北省气候生产潜力的估算与区划[J].中国农业 气象,2008,29(1):37-41.

- [25] 孙善磊,周锁铨,石建红,等.应用三种模型对浙江省植被净第一性 生产力(NPP)的模拟与比较[J].中国农业气象,2010,31(2): 271-276.
- [26] 李军玲,邹春辉,刘忠阳,等.河南省陆地植被净第一性生产力估算 及其时空分布[J].草业科学,2011,28(10):1839-1844.
- [27] 仓生海.青海省天然草地植被净初级生产力分析——基于 Miami 模型[J].安徽农业科学,2011,39(11):6409-6410.
- [28] 于智媛,梁书民.基于 Miami 模型的西北干旱半干旱地区灌溉用水 效果评价-以甘宁蒙为例[J].干旱区资源与环境,2017,31(9): 49-55.
- [29] 梁书民,于智媛.用经验径流系数推算全球径流深度分布场[J].干 旱区研究,2018,35(1):1-11.
- [30] Hijmans R J, Cameron S E, Parra J L, et al. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas [J]. International Journal of Climatology, 2005, 25: 1965–1978.
- [31] Trabucco A, Zomer R J. Global Aridity Index (Global-Aridity) and global potential evapo-transpiration (Global-PET) geospatial database [DB/OL] // CGIAR Consortium for Spatial Information Published Online, 2009, CGIAR-CSI GeoPortal at http://www.csi.cgiar.org/.
- [32] Jarvis A, Reuter H I, Nelson A, Guevara E. Hole-filled SRTM for the globe version 4 [DB/OL]. 2008, CGIAR – CSI SRTM 90m Database at http://srtm.csi.cgiar.org.

(上接第95页)

参考文献:

- Myers L E, Bucks D A. Uniform irrigation with low-pressure trickle systems [J]. Journal of Irrigation&Drainage Division, 1972, 98 (3): 341-346.
- [2] Wu I P, Gitlin H M. Hydraulic and uniformity for drip irrigation [J]. Journal of the Irrigation & Drainage Division, 1973,99(2):157-168.
- [3] Warrick A W, Yitayew M. Trickle lateral hydraulics. I: Analytical solution [J]. Journal of Irrigation & Drainage Engineering, 1988, 114(2): 281-288.
- [4] Valiantzas J D. Analytical approach for direct drip lateral hydraulic calculation [J]. Journal of Irrigation & Drainage Engineering, 1998, 124 (6):300-305.
- [5] Valiantzas J D. Hydraulic analysis and optimum design of multidiameter irrigation laterals [J]. Journal of Irrigation & Drainage Engineering, 2002, 128(2):78-86.
- [6] Valiantzas J D, Inlet pressure, energy cost, and economic design of tapered irrigation submains[J]. Journal of Irrigation & Drainage Engineering, 2003, 129(2):100-107.
- [7] Valiantzas J D, Explicit hydraulic design of micro-irrigation submain units with tapered manifold and laterals [J]. Journal of Irrigation & Drainage Engineering, 2003, 129(4):227-236.
- [8] 魏秀菊.平坦地形时微灌设计单元内允许压差在支、毛管上的合理 分配[J].喷灌技术,1995,(3):16-18.
- [9] 张林,吴普特,牛文全,等.均匀坡度下滴灌系统流量偏差率的计算 方法[J].农业工程学报,2007,23(8):40-44.
- [10] 张国祥,吴普特.滴灌系统滴头设计水头的取值依据[J].农业工程 学报,2005,21(9):20-22.

- [11] 张国祥、微灌毛管水力学研究:微灌水力设计计算方法探讨之一
 [J].喷灌技术,1990,(2):9-16,64.
- [12] 张国祥.微灌毛管水力设计的经验系数法:微灌水力设计计算方法 探讨之三[J].喷灌技术.1991,(1):4-8,64.
- [13] 郑纯辉,康跃虎,王丹.满足灌水器平均流量和灌水均匀度的微灌 系统优化设计方法[J].干旱地区农业研究,2005,23(1):28-33.
- [14] 鞠学良.微灌系统田间管网水力解析模型与优化设计方法研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2017.
- [15] 张志新,王建东,李鑫,赵月芬.虚拟节点有限元法解析滴灌支管水力学计算[J].农业机械学报,2009,40(3):99-102.
- [16] 张志新,王建东,徐锁军,等.虚拟节点有限元法解析滴灌毛管水力 特性[J].农业机械学报,2009,40(2):68-70,36.
- [17] 王新坤.微灌系统遗传算法优化设计理论与应用[M].北京:中国 水利水电出版社,2010.
- [18] 王新坤,蔡焕杰.微灌毛管水力解析及优化设计的遗传算法研究[J].农业机械学报,2005,36(8):55-58.
- [19] 白丹,党志良.不规则微灌田间管网的优化[J].农业机械学报, 1997,28(1):53-57.
- [20] 康跃虎.微灌系统水力学解析和设计[M].西安:陕西科学技术出版社,1999:9-42.
- [21] 熊国武.基于 MATLAB 的微灌系统水力计算程序设计及工程应用 [D].西安:西安建筑科技大学,2006.
- [22] 中华人民共和国水利部.GB/T50485-2009, 微灌工程技术规范[S]. 北京:中国计划出版社, 2009.
- [23] 王新坤.微灌管网水力解析及优化设计研究[D].陕西杨凌:西北 农林科技大学,2004.