

基于GIS的全球农业开发潜力和人口承载力分析

梁书民^{1,†} 刘岚² 崔奇峰¹ 朱立志¹

1. 中国农业科学院农业经济与发展研究所, 北京 100081; 2. 北京大学人口研究所, 北京 100871;
† E-mail: liangshumin@caas.cn

摘要 基于迈阿密自然生态系统生产力模型, 绘制高精度的人均农作物产量分布图; 计算水资源高效利用条件下全球宜农荒地的农作物生产潜力; 对不同农业投入水平和食物消费水平组合下的地球人口承载力进行超远期情景分析。按经济产量干重计量, 通过计算得出全球宜农荒地的农作物生产潜力为 60.39 亿 t, 加上现有耕地的农作物产量和增产潜力以及跨流域调水垦荒的农作物生产潜力, 全球最大可持续农作物产量为 160.15 亿 t, 是目前全球农作物产量的 3.09 倍; 在中投入和中消费情景下, 2100 年全球可承载 121.1 亿人口, 是当前全球总人口的 1.60 倍。为保障粮食安全, 我国农业未来的发展方向应当是增加农业投入, 提升农业生产技术水平, 高效地开发利用水资源和土地资源, 同时加强国际农业合作交流, 加快先进农业生产技术在发展中国家的推广。

关键词 全球宜农荒地; 农业开发潜力; 人口承载力; 迈阿密模型; 自然生态系统生产力; 宜农荒地资源; 地理信息系统(GIS)

Global Agricultural Development Potential and Population Carrying Capacity Analysis Based on GIS

LIANG Shumin^{1,†}, LIU Lan², CUI Qifeng¹, ZHU Lizhi¹

1. Institute of Agricultural Economics and Development, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081;
2. Institute of Population Research, Peking University, Beijing 100871; † E-mail: liangshumin@caas.cn

Abstract Based on Miami model of natural ecosystem productivity, a high-precision per capita crop yield distribution map is drawn, global agricultural development potential is calculated on the condition of high-efficiently use of water resources, and scenario analysis method is applied to predict the future population supporting capacity of the earth. The potential yield of crops in the world's wasteland suitable for agriculture is 6039 million tons of dry material of economic yield. If it is added up with the current crop yield and yield increase potential of existing cultivated land, and crop production potential of reclaiming wasteland by water diversion across river basins, the maximum sustainable output capacity of crops in the world is 16015million tons, which is 3.09 times of the current global crop production. In the case of medium input and medium consumption, the global can support 12.11 billion populations in 2100, which is 1.60 times of the current global total population. The paper concludes that, in order to ensure food security, China's future agricultural development should be concentrated on increasing agricultural input, promoting advanced agricultural production technology, and efficiently exploring and utilizing water resources and arable land resources. More over international agricultural cooperation and exchanges should be strengthened, and the spread of advanced agricultural production technologies in developing countries should be accelerated.

Key words global reclaimable wasteland; agricultural development potential; population carrying capacity; Miami model; natural ecosystem productivity; wasteland resources suitable for agriculture; GIS (geographic information system)

联合国粮食及农业组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)的统计数据^[1]表明,2017年全球营养不良人口为8.208亿,占总人口的10.9%。与2015年相比,营养不良人口的数量和占比明显增长,2005年以来连续下降的大趋势被逆转。德国世界饥饿救助组织(Deutsche Welthungerhilfe)发表的2018年全球饥饿指数地图^[2]显示,多数非洲国家饥饿指数值较高,其次是南亚和东南亚国家,而拉丁美洲、中国、中亚、西亚和北非石油出口国以及东欧国家饥饿指数明显降低,欧美发达国家、澳大利亚、新西兰、日本和韩国饥饿指数最低。这些数据表明,全球食物安全状况与经济发展水平密切相关,虽然最近10多年有较大的改善,但由于恶劣的自然条件和战乱,距离实现消除饥饿和贫困的目标仍然很遥远。

从生态学的角度看,全球食物安全状况的改善取决于地球人口承载力和农业投入水平。Helmut^[3]提出迈阿密自然生态系统生产力模型(Miami model of natural ecosystem productivity,简称迈阿密模型),为研究地球人口承载力奠定理论基础。张允芳^[4]指出,发展中国家解决粮食问题的出路在于应用科学技术提高产量,其中良种、化肥、农药、灌溉和农机等是关键技术。Dyson^[5]认为,影响世界粮食未来需求的主要因素有人口、城市化率和人均GNP,影响世界粮食未来供给的主要因素有耕地面积、潜在可耕地面积、耕地灌溉率以及单位耕地面积化肥施用量。

有关全球农业生产潜力的研究很多。FAO和IIASA经过30年的研究,于2000年发布首版全球农业生态区划(GAEZ)数据库,2012年升级为第3版^[6]。在该数据库中,根据全球热量条件和水资源条件,对全球雨养农业熟制进行区划,并绘制增产潜力分布图,适用于计算全球宜农荒地的生产潜力和农田在高投入条件下的增产潜力^[7]。Brown^[8]经过多年的研究,认为中国未来存在粮食和资源危机。赵文武^[9]的研究结果表明,1961年以来耕地面积增加较快的国家主要位于南美洲、非洲、大洋洲和东南亚。Barretto^[10]研究农业资源大国巴西1960年以来的农业用地扩张,计算出巴西宜农荒地面积为1.22亿ha。张小瑜^[11]认为,南美洲、独联体国家和东欧等地区将是重要的潜在增产区域。李文华等^[12]指出,我国农业生态环境恶化,耕地资源对粮食生产的后续支撑能力不足,“水减粮增”矛盾突出,“北粮

南运”难以为继。胡琼等^[13]通过30 m地面精度的全球耕地利用格局时空变化分析,发现2000—2010年全球耕地面积增加2.19%,增幅最大的国家主要分布在非洲和南美洲,如坦桑尼亚、尼日利亚、苏丹、巴西和阿根廷。

全球粮食贸易可以解决自然资源与人口分布不匹配的问题,是提升全球食物安全水平的重要手段。吴朝阳^[14]指出,支撑粮食消费增长的因素主要包括全球人口增长、经济增长、人均收入水平提高以及生物能源的开发和利用。倪洪兴^[15]认为,发达国家粮食生产过剩,发展中国家粮食供应不足,但是,相对于有购买力的有效需求,国际农产品市场供给充裕,曾在相当长的时期内供过于求,粮食等农产品供给集中度很高,大宗农产品贸易主要被少数跨国公司掌控,具有准垄断性。王溶花等^[16]的研究结果表明,北美洲、南美洲、欧洲和大洋洲是主要粮食出口地区,非洲和亚洲是主要粮食进口地区。杨晓东^[17]指出,转基因粮食贸易的发展对中国粮食安全带来冲击和影响,美国粮食霸权对中国粮食安全产生重要影响,跨国粮商全产业链渗透会削弱中国对粮食产业的调控能力。许世卫等^[18]发现,世界粮食贸易量增速先慢后快,粮食贸易聚集效应明显,中国成为粮食贸易大国。

FAO于2018年发布研究报告《未来食物和农业——实现2050年目标的各种途径》^[19],在对2050年全球人口发展和食物生产进行可持续发展(较均衡的经济增长)、正常商业(正常的经济增长)和社会分层化(较快速的经济增长)3种情景分析后指出,正常商业情景下,与2012年相比,2050年全球耕地面积从15.67亿ha增至17.32亿ha,增长11.1%;农作物单位面积产量(简称单产,薯类、蔬菜和水果等产量以鲜重计量)增长12.8%,从6.2 t/ha增至7.5 t/ha;人口从70.98亿增加到97.25亿,增长13.7%。该项预测是基于低投入和低消费情景的保守预测,没有考虑消费水平随经济发展递增的普遍规律。实际上,2017年全球人均农作物产量(简称人均产量)水平已经接近其预测的2030年正常商业情景下的消费水平。

在水资源高效利用的前提下,本文将基于GIS(geographic information system,地理信息系统)大数据进行10 km地面精度的全球人均产量和食物生产潜力测算,对不同农业投入水平和食物消费水平组合下的地球人口承载力进行超远期情景分析,并提

出促进全球农业和人口可持续发展的对策建议。

1 研究方法 with 数据

1.1 理论与假设

迈阿密模型适用于农田生态系统,光温潜力指标适宜于表征灌溉农田生产潜力,气候潜力指标适宜于表征雨养农田生产潜力。利用迈阿密模型和水热因子,可以推算全球农田的自然生产力分布,还可以推算全球宜农荒地的自然生产力分布,进而利用全球平均经济系数计算宜农荒地的产量分布,并进行分区域统计汇总。利用各个国家的农作物生产数据,可以推算分国别的经济系数和全球农作物产量分布。将高精度人口密度图与农作物产量分布图交并(Combine),可以推算人均食物产量分布。本文将全部农作物产量折合成经济产量干重来计算,按照中国将薯类折合成粮食的算法,将FAO用鲜重记产量的农作物(如薯类、块根块茎作物、水果和蔬菜)的干重折算系数统一为0.2,与FAO用热量值计算食物消费量的计量法接近。

农作物产量增加包括单产增加和播种面积增加。播种面积增加主要是开垦宜农荒地,增加复种指数,减少耕地撂荒和休耕。新开垦的宜农荒地多为雨养农业,面积的扩大主要体现在对气候生产潜力的开发利用上。影响农作物单产增长的因素以灌溉、良种和土壤肥力为主。根据李比希(Liebig)^[20]的最小养分定律,化肥使用存在边际效益递减现象,对单产增加的贡献率随着施用量的增加而下降;由于农作物良种培育已在全世界推广,并从注重农产品产量向注重农产品质量转变,对单产增加的贡献率也逐步下降;灌溉对提高农作物单产的作用不存在边际效益递减现象,将逐步占据主导地位。在充分满足水分、土壤肥力和农作物良种等条件的情况下,水田和灌溉农田的单产水平主要决定于自然因素,即光温生产潜力。

1.2 研究方法

本文利用 ArcGIS 软件的 GIS 空间分析、格栅层面叠加交并、表格汇总和空间统计等功能计算生产潜力。采用摩尔魏德(Mollweide)的等面积地图投影方法^[21],便于面积汇总。地面精度统一为0.083°,投影转化后的格栅间距为10205.485 m,投影中央经线取东经10°,边缘经线纵穿白令海峡、太平洋中部和南极洲罗斯湾,切割陆地长度最短,并且主要位于南极洲冰原,有利于展示世界陆地要素分布。

通过绘制泰森(Thiessen)多边形^[22],计算高精度人口密度图。根据高精度气候潜力、光温潜力和灌溉率分布以及各国经济系数,计算高精度的农作物单产分布。将人口密度与农作物单产格栅交并,计算人均产量格栅。

将宜农荒地、水资源、气候潜力和光温潜力格栅交并,根据经济系数,计算宜农荒地的农业生产潜力格栅。为生成宜农荒地格栅,本文合并使用两组全球土地覆盖分类系统:FAO的GLC数据和ESA的GlobCover数据。FAO于2013年发布GLC数据^[23],地面分辨率为0.0083°,土地覆盖类型为人工地表、农田、草地、森林、灌丛、草本湿地、红树林、稀疏植被、裸地、冰雪和水体11大类。通过与2014年出版的中国土地利用图^[24]相比较,发现其中农田类的划分准确度较高,但森林类的划分过于笼统,不区分寒带针叶林、热带雨林、温带阔叶林以及森林覆盖率较高的稀树草原。ESA于2010年发布GlobCover数据^[25],地面分辨率为0.0028°,较详细地将土地覆盖分为23类。将GLC农田格栅与GlobCover格栅交并后,按照GlobCover分类系统,将宜农荒地分3类:1)已开发成含有农田的地块,主要有农田夹灌丛草地或灌丛草地夹农田;2)传统的宜农荒地,包括疏落叶阔叶林、草地灌木林、林灌草地、密疏灌丛、密疏草地、稀疏灌草林地和裸地;3)拓展宜农荒地,包括密落叶阔叶林、针阔叶混交林、淡渍密阔叶林和水渍密疏林灌草地。不属于宜农荒地的土地覆盖类型是被保护或不适宜开垦的森林,主要有常绿阔叶林、密常绿针叶林、疏落叶针叶林和咸渍密常绿阔叶林,以及河湖水面、水库、永久冰雪和城乡建成区。

本文用宜农荒地地面坡度来划分农业开发投入水平。根据面积自然断点分类法,定义地面精度为10 km的数字高程模型(digital elevation model, DEM)格栅层面的坡度(SL)≤1.9°为可开发宜农荒地,其中0°≤SL≤0.3°为低投入可开发宜农荒地,0.3°<SL≤1.1°为中投入可开发宜农荒地,1.1°<SL≤1.9°为高投入可开发宜农荒地;SL>1.9°为不可开发的宜农荒地。

1.3 计算步骤

1.3.1 高精度人均产量格栅数据计算步骤

1) 根据乡镇级居民点人口分布,生成泰森多边形层面,并计算泰森多边形的面积。

2) 根据泰森多边形面积和居民点人口数,计算

多边形区域的人口密度,并将人口密度层面转换成像元大小为 10.205485 km 的栅格数据。

3) 利用 GIS 空间分析模块,将灌溉栅格、气候生产潜力栅格、光温生产潜力栅格和分国经济系数栅格交并,计算农作物单产栅格。

4) 通过交并人口密度栅格与农作物单产栅格,并进行栅格表格计算,生成人均产量栅格。

1.3.2 宜农荒地农业生产潜力计算步骤

1) 生成地面坡度栅格:根据 DEM 原始数据,在地理投影下,通过重新取样,将地面精度降为 0.083°,然后转换成精度为 10.205485 km 的摩尔魏德投影,并计算坡度。

2) 生成宜农荒地栅格:将 GLC 农田栅格与 GlobCover 土地覆盖栅格的投影和地面精度统一后进行交并,根据宜农荒地分类,重新生成宜农荒地栅格。

3) 计算覆膜滴灌生产潜力栅格:通过交并地面径流栅格^[26]和灌溉需水量栅格^[27],计算覆膜滴灌垦殖率;通过交并覆膜滴灌垦殖率栅格和光温潜力栅格,计算覆膜滴灌生产潜力,根据由中国东北和内蒙古地区雨养农业分布状况得到的经验值,覆膜滴灌生产潜力的最低值取为 4800 kg/ha。

4) 计算农作物产量:将坡度、宜农荒地、国家和地区以及覆膜滴灌生产潜力 4 栅格层面交并,逐个像元地计算生产潜力,并根据全球平均经济系数计算经济产量。

5) 分类汇总:用农作物经济产量干重计量,利用宜农荒地栅格的表格模块,计算分大区、分国家的宜农荒地面积、覆膜滴灌技术下的农作物生产潜力以及三大地面坡度区域的农作物生产潜力。

1.4 数据来源

主要有 FAO-STAT 的分国农业生产统计^[28]、FAO 的 GLC 的全球农田分布栅格数据^[23]、ESA 的 GlobCover 全球土地覆盖栅格数据^[25]、美国哥伦比亚大学根据各国人口普查数据整理生成的 GPW-v4 地理投影点数据^[29](本研究中将空间精度统一到乡镇级行政区)、FAO 的全球灌溉农田栅格数据^[30]、Worldclim 的全球多年平均降水量和年均气温栅格数据^[31]以及 STRM-V4 的 DEM 坡度数据^[32],世界最新行政区划图来源于 NACIS(North American Cartographic Information Society)提供的 Natural Earth 数据^[33]。

2 计算结果

2.1 人口密度分布

人口密度栅格计算结果^[29,34]表明,全球人口密度与产业形态高度吻合,产业形态之间人口密度存在大致十倍递增的规律。人口密度 ≤ 10 人/km²的地区,农业经济活动以狩猎采集为主,如西伯利亚、澳大利亚内陆、撒哈拉沙漠和亚马逊热带雨林;人口密度为 11~100 人/km²的地区,农业经济活动主要是畜牧和放牧,如中国内蒙古地区、中亚地区、非洲和南美洲许多地区;人口密度为 101~1000 人/km²的地区,农业经济活动主要是农作物种植,如中国东南半部、南亚、印度尼西亚爪哇岛、非洲的人口大国尼日利亚和埃塞俄比亚;人口密度在为 1001~10000 人/km²的地区主要是城镇化地区,分布于全球城市和城镇地区,经济活动以第二产业为主;人口密度 > 10000 人/km²的地区主要是大城市中央商务区,仅分布于全球大城市中心地带,经济活动以第三产业为主。其中,狩猎采集业、畜牧业和农作物种植业的相对人口密度符合 Lindeman^[35]提出的生态系统十分之一定律。

2.2 农作物单产水平

农作物单产水平主要由气候生产潜力决定,各国受农业灌溉和农业生产技术水平影响的程度有很大的差异。图 1 显示,中国、埃及和孟加拉国农田灌溉发达,印度尼西亚和马来西亚气候潜力较高,农作物单产水平均较高。加拿大、俄罗斯、东欧和北欧国家气候寒冷,农田仅能一年一熟,农作物单产水平低。澳大利亚由于旱灾频发,气候生产潜力低,水资源缺乏,农作物单产也较低。中美洲和非洲(不含埃及)气候潜力高,但农作物单产低,主要是由当地经济作物和水果种植面积较大、经济作物的经济系数较低以及水果按干重计算等因素导致的。另外,发展中国家农业投入水平低,农业机械化程度低,也是单产低的重要原因。

2.3 人均产量

人均产量由人口密度和农作物单产共同决定。图 2 显示,南亚和非洲人均产量最低,其次是中国,欧洲、中亚、西亚、东南亚和中美洲居中,北美洲、南美洲、澳大利亚最高。一般规律是,人口密度越高,人均产量越低,如中国的人均产量低于美国;在人口密度相同的情况下,农作物单产越高,人均产量越高,如中国高于印度;在单产水平相当

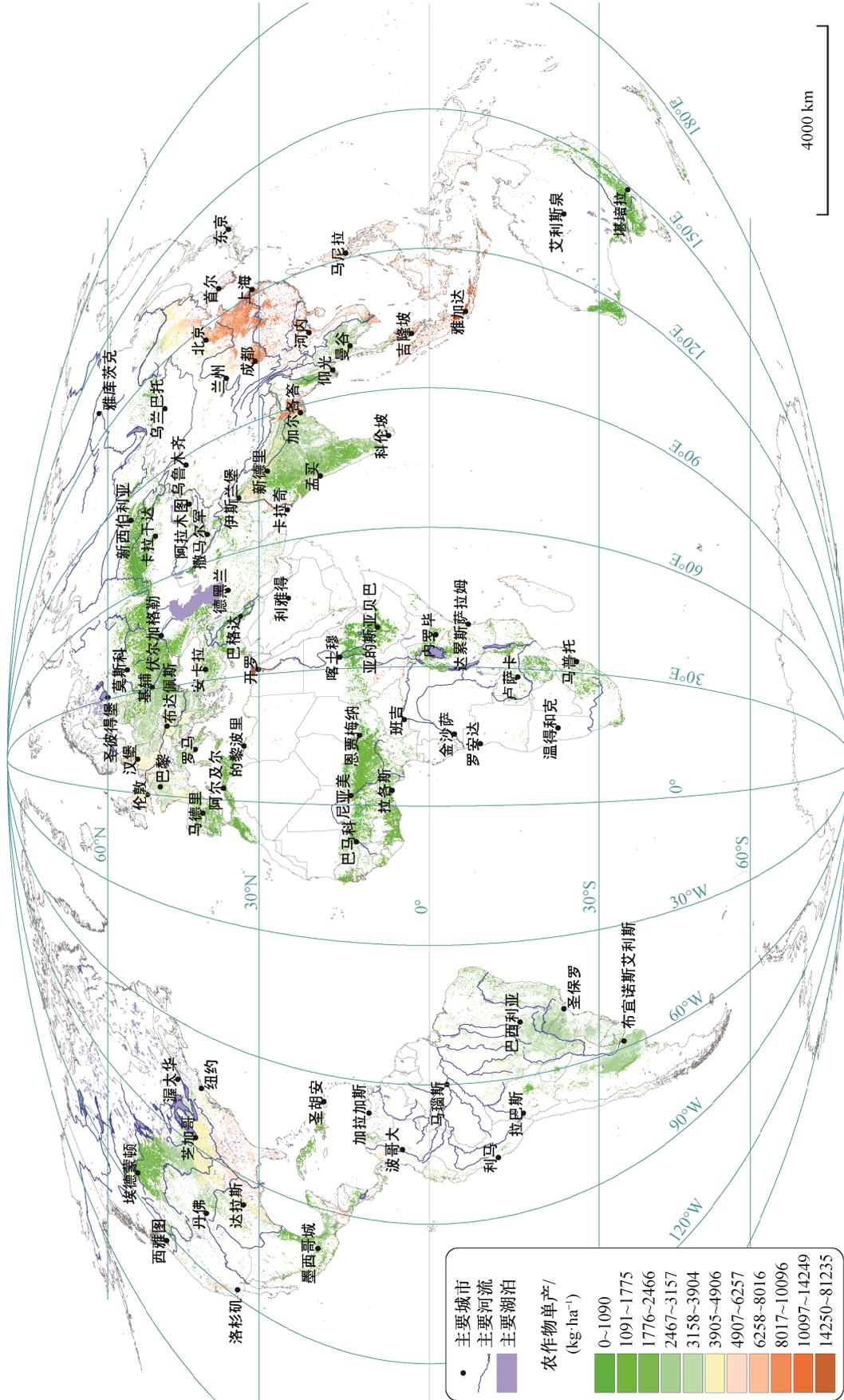


图 1 按国别经济系数计算得出的全球农作物单位面积经济产量干重分布
Fig. 1 Distribution of dry weight of economic yield per unit area of crops in the world calculated by economic coefficient at nation level

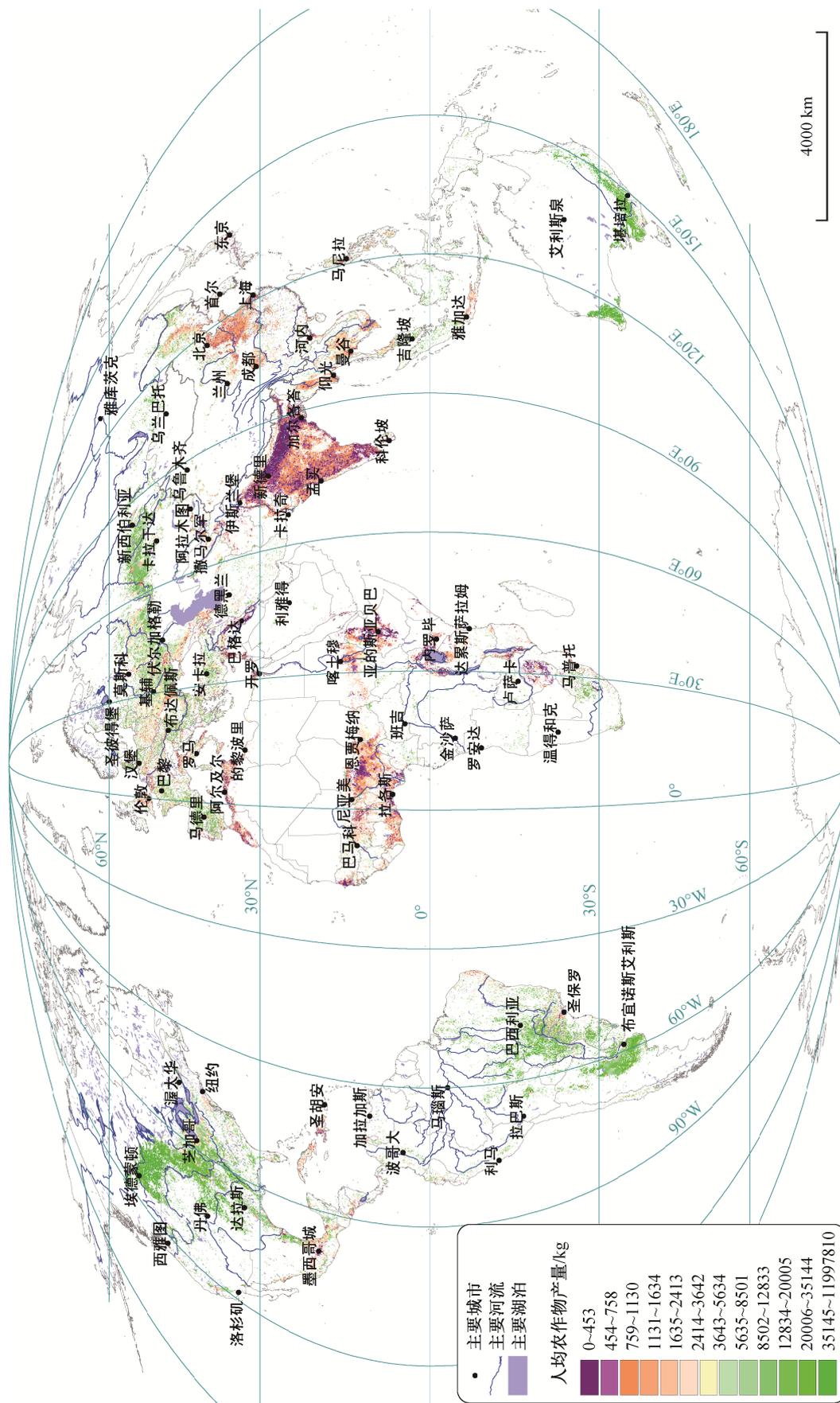


图 2 按国别经济系数计算得出的全球人均农作物经济产量干重分布
 Fig. 2 Distribution of dry weight of crop's economic yield per capita in the world calculated by economic coefficient at nation level

的情况下,人口密度越高,人均产量越低,如东欧人均产量低,而加拿大、俄罗斯和北欧人均产量高。图2与营养不良人口分布图^[1]和全球饥饿指数地图^[2]高度吻合。根据诺特斯坦人口发展阶段论^[36]和马尔萨斯陷阱理论^[37]判断,目前世界上高收入和高城镇化率的发达国家(如欧美国家、澳大利亚、日本和韩国)已经成功地绕过马尔萨斯陷阱,但只有部分发展中国家(如中国和巴西)绕过马尔萨斯陷阱。比较中国与印度的粮食生产和城镇化发展状况可知,印度人均产量干重约为400 kg/人,城镇化率为32.0%,人均GDP为2165美元,人口发展处于高生育率、低死亡率和高增长率阶段,正陷入马尔萨斯陷阱;中国人均产量干重约为700 kg/人,城镇化率为58.5%,人均GDP为10121美元,人口发展进入低生育率、低死亡率和低增长率阶段,已经突破马尔萨斯陷阱。与印度类似的国家主要有南亚诸国、西亚的战乱国家(阿富汗、伊拉克和叙利亚)以及多数非洲国家(南非除外),与中国类似的国家主要有俄罗斯、南非、朝鲜、蒙古、西亚多数石油国家以及中亚、南美洲、中美洲、加勒比海和东欧国家。

2.4 宜农荒地开发潜力

根据联合国粮农组织的统计数据,2016年全球168国农作物产量折合干重为51.09亿t,根据迈阿密模型、FAO-GLC耕地农田分布图^[23]和FAO灌溉分布图^[30],参照我国东北平原的土地垦殖率,按图斑垦殖率为0.8折算农田面积,基于GIS计算得出的全球当前农田干物质总产量216.08亿t,得出全球平均农作物经济系数为0.2364,用于统一口径地计算宜农荒地经济产量。

在计算宜农荒地干物质产量时,可开垦面积也按照垦殖率为0.8来计算,得到宜农荒地图斑面积为23.791亿ha,全球可开垦耕地总面积为19.033亿

ha。从表1可以看出,可开垦耕地主要分布于非洲、亚洲北部、南美洲、大洋洲和中北美洲。按照覆膜滴灌利用本地径流垦荒,农作物熟制为8000 kg/ha,可保障一熟计算,干旱区和寒冷区最低单熟制单产取4800 kg/ha,得到全球覆膜滴灌垦荒的农作物经济产量干重为60.386亿t,其中非洲(23.145亿t)和南美洲(12.955亿t)最多,其次为亚洲北部(6.303亿t)和中北美洲(6.124亿t),大洋洲和亚洲南部的宜农荒地农作物产量在4亿~5亿t之间,欧洲最低(<3亿t)。图3显示,全球各地水热条件各异,在多熟制情况下,宜农荒地农作物单产最高为亚洲南部的4975 kg/ha,最低为亚洲北部的1888 kg/ha,从高到低依次为亚洲南部、南美洲、非洲、中北美洲、欧洲、大洋洲和亚洲北部。其中,亚洲南部和南美洲为单产高值区,主要是由于宜农荒地位于热带地区,水热条件匹配较好;亚洲北部为低值区,主要是由于宜农荒地位于温带和寒温带,受热量条件限制,农作物仅能一年一熟;大洋洲宜农荒地主要分布于澳大利亚,受水分条件的限制,农作物单产也较低。

从表2可以发现,全球宜农荒地开发潜力最大的国家是巴西(7.405亿t)、澳大利亚(4.875亿t)、刚果(金)(4.432亿t)、美国(4.186亿t)、俄罗斯(3.794亿t)和安哥拉(2.605亿t),印度尼西亚、中非、赞比亚、加拿大、中国、委内瑞拉、莫桑比克、阿根廷、哥伦比亚和坦桑尼亚在1亿~2亿t之间,南苏丹、哈萨克斯坦、南非、尼日利亚、刚果(布)和玻利维亚在0.6亿~0.9亿t之间。上述22个国家的宜农荒地农作物产量合计45.64亿t,占全球的75%。排前50位的国家宜农荒地农作物产量均在0.2亿t以上,合计55.96亿t,占全球的92%。中国的宜农荒地农作物生产潜力为1.394亿t,主要分布于大兴

表1 全球七大区宜农荒地开发潜力

Table 1 Development potential of wasteland suitable for agriculture in seven regions of the world

大区	宜农荒地面积/亿 ha	农作物产量干重/亿 t	农作物单产/(kg·ha ⁻¹)	备注
中北美洲	2.212	6.124	2768	含加勒比海岛屿和巴拿马
南美洲	2.895	12.955	4475	不含巴拿马
非洲	6.367	23.145	3635	
大洋洲	2.384	4.952	2077	不含巴布亚新几内亚
欧洲	0.974	2.623	2694	不含俄罗斯
亚洲北部	3.339	6.303	1888	俄罗斯、中亚和东北亚
亚洲南部	0.861	4.285	4975	西亚和巴布亚新几内亚
总和	19.033	60.386	3173	

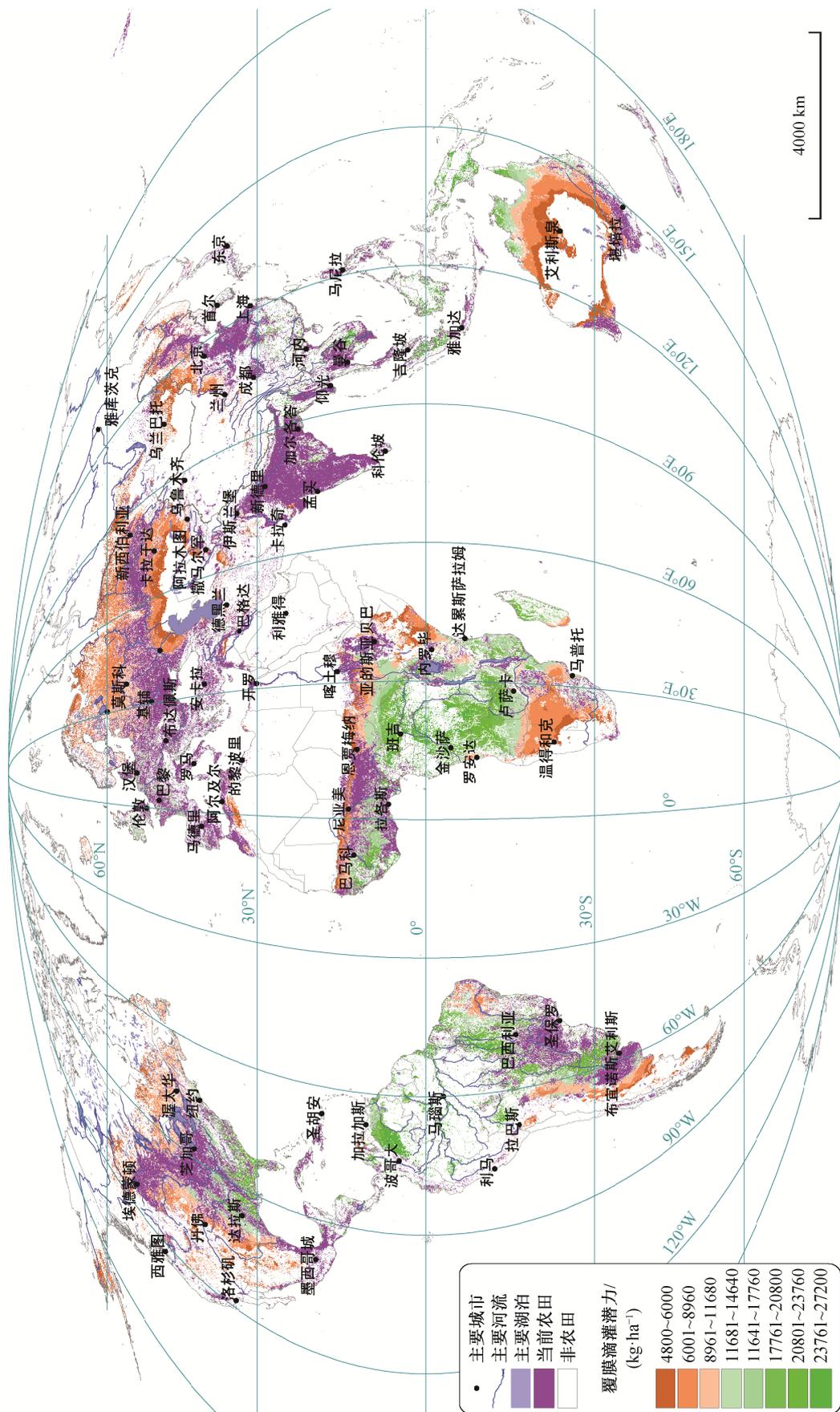


图 3 按全球平均经济系数计算得到的全球宜农荒地覆膜滴灌生产潜力分布
 Fig. 3 Distribution of potential crop yield by drip irrigation with plastic film mulching on wasteland suitable for agriculture in the world calculated by global average economic coefficient

表 2 全球 50 个国家宜农荒地开发潜力
Table 2 Development potential of wasteland suitable for agriculture in fifty nations of the world

大区	国家	宜农荒地面积/亿 ha	农作物产量/亿 t	大区	国家	宜农荒地面积/亿 ha	农作物产量/亿 t
中北美	美国	1.212	4.186	非洲	纳米比亚	0.273	0.474
中北美	加拿大	0.864	1.439	非洲	乍得	0.176	0.447
南美洲	巴西	1.582	7.405	非洲	马里	0.166	0.438
南美洲	委内瑞拉	0.264	1.271	非洲	埃塞俄比亚	0.164	0.372
南美洲	阿根廷	0.414	1.163	非洲	津巴布韦	0.144	0.368
南美洲	哥伦比亚	0.192	1.116	非洲	加纳	0.082	0.316
南美洲	玻利维亚	0.158	0.620	非洲	乌干达	0.072	0.299
南美洲	乌拉圭	0.101	0.489	非洲	布基纳法索	0.122	0.299
南美洲	巴拉圭	0.057	0.281	非洲	肯尼亚	0.138	0.294
南美洲	秘鲁	0.054	0.278	非洲	博茨瓦纳	0.171	0.288
非洲	刚果(金)	0.826	4.432	非洲	塞内加尔	0.091	0.222
非洲	安哥拉	0.626	2.605	大洋洲	澳大利亚	2.364	4.875
非洲	中非共和国	0.350	1.670	欧洲	法国	0.115	0.408
非洲	赞比亚	0.403	1.662	欧洲	德国	0.082	0.246
非洲	莫桑比克	0.330	1.203	欧洲	波兰	0.080	0.228
非洲	坦桑尼亚	0.299	1.064	欧洲	白俄罗斯	0.079	0.201
非洲	南苏丹	0.248	0.875	亚洲北	俄罗斯	2.183	3.794
非洲	南非	0.314	0.709	亚洲北	中国	0.453	1.394
非洲	尼日利亚	0.153	0.672	亚洲北	哈萨克斯坦	0.493	0.753
非洲	刚果(布)	0.109	0.618	亚洲南	印度尼西亚	0.294	1.795
非洲	科特迪瓦	0.131	0.551	亚洲南	印度	0.117	0.525
非洲	苏丹	0.277	0.549	亚洲南	巴布亚新几内亚	0.069	0.416
非洲	马达加斯加	0.127	0.529	亚洲南	柬埔寨	0.045	0.258
非洲	几内亚	0.098	0.517	亚洲南	缅甸	0.045	0.255
非洲	喀麦隆	0.090	0.480	亚洲南	马来西亚	0.035	0.212

安岭西麓、东麓和鄂尔多斯高原,受干旱和低温双重限制,农作物单产较低;南方丘陵有零星分布的高产宜农荒地,但规模小,地面坡度大,不适宜机械化耕作,开发难度较大。

据计算,全球现有耕地覆膜滴灌可增产 11.72 亿 t,跨流域调水覆膜滴灌垦荒可增产 36.18 亿 t^[38]。本文计算得出覆膜滴灌全面开发宜农荒地可增产 60.386 亿 t(为避免重复计算,未包含跨流域调水垦荒区的增产潜力),农田覆膜滴灌、开垦宜农荒地和调水垦荒三项农业生产技术合计增产总潜力为 108.28 亿 t。2017 年全球农作物产量干重为 51.86 亿 t,合计增产总潜力约为当年产量的 2.09 倍。由于农田覆膜滴灌、开垦宜农荒地和调水垦荒的难度系数递增,按照农业开发先易后难的原则,推广覆膜滴灌技术是当前农作物增产的主要途径;开垦宜农荒地的增产潜力最大,工程技术难度随地面坡度增

加而增大,受各国环境保护政策的限制,不宜全面展开,但低坡度的平坦地区可优先开发;调水垦荒的成本随规模增大而提高,工程技术难度也因地形和地貌不同而各异,但增产效果最明显,可以根据工程实施条件和技术经济效益的高低逐步开展。中小规模调水工程可优先建设,其次是建设效益高的大规模调水项目,超大规模的调水项目可通过调整规划,适当地缩小规模,分步骤建设。

3 承载力情景分析

按照三次产业演化和三次产业土地生产率递减的经济规律,经济发展起源于大中城市中心区的消费增长和第三产业扩张,首先带动外围的第二产业扩张,导致食物消费增长,进而带动第一产业扩张,第一产业内部又存在农业、放牧畜牧业和狩猎采集业土地生产率递减,相继扩张的现象。消费增长和

第三产业发展犹如从大城市掀起的波浪向边远地区扩散,带动全球经济增长、城镇扩张和农业发展。下面将根据历史趋势,对高、中、低投入和消费共 9 种投入-消费组合情景进行预测,分析各种情景出现的条件,并判断情景发生的可能性。

1961—2017 年的 56 年间,世界农作物总产量干重从 14.52 亿 t 增至 51.86 亿 t, 年均增幅为 2.27%; 人口从 30.9 亿增至 75.5 亿, 年均增幅为 1.60%, 对农产品需求增长的贡献为 70.2%; 人均产量从 470.0 kg/人增至 686.9 kg/人, 年均增幅为 0.68%, 对农产品需求增长的贡献为 29.8%。这组历史数据是本文预测未来全球农产品需求的重要依据。

根据格栅数据计算和汇总结果,开垦 $SL \leq 1.9^\circ$ 的宜农荒地,农作物经济产量干重可增加 60.39 亿 t, 其中开垦 $0^\circ \leq SL \leq 0.3^\circ$, $0.3^\circ < SL \leq 1.1^\circ$ 和 $1.1^\circ < SL \leq 1.9^\circ$ 的宜农荒地,农作物经济产量干重分别增加 18.87, 27.90 和 13.62 亿 t。根据宜农荒地不同坡度段的面积结构,对各大区宜农荒地开发难易程度进行评价(缓坡地区最易开发,陡坡地区最难开发,中坡地区的开发难度居中),结果显示南美洲和大洋洲最易开发,其中南美洲缓坡面积占比最大,大洋洲陡坡面积占比最小;中北美洲、亚洲北部和欧洲开发难度居中;非洲和亚洲南部最难开发,其中非洲缓坡面积占比最小,亚洲南部陡坡面积占比最大(表 3)。

参照 Goode 世界地图集^[39],全球宜农荒地集中连片的低坡度和平坦的 25 个地区分布情况(图 4)如下:非洲有 5 个地区(南苏丹尼罗河上游盆地、撒哈拉沙漠南缘、索马里巴纳迪尔平原、博茨瓦纳卡拉哈迪盆地和莫桑比克沿海平原),南美洲有 3 个地区(阿根廷拉普拉塔平原、委内瑞拉奥里诺克平原和巴西中部阿拉圭(Araguaia)河谷地的坎波斯(Campos)

热带草原),北美洲有 3 个地区(美国东南部沿海平原、北美大平原尚未开垦的局部地区和加拿大尚未开垦的中部和东南部平原),澳大利亚有两个地区(北部卡奔塔利亚湾平原和东部达令河平原),俄罗斯和中亚有 3 个地区(西西伯利亚平原南部、里海北部沿岸平原和天山帕米尔高原西麓平原),东北亚有 4 个地区(大兴安岭西麓平原、大兴安岭南麓平原、鄂尔多斯高原和黑龙江-阿穆尔河中下游平原),东南亚有 4 个地区(柬埔寨东部平原、加里曼丹岛、苏门答腊岛和新几内亚岛沿海平原),欧洲有一个地区(东欧平原北部)。这些地区可作为宜农荒地优先开发区。

按投入水平计算宜农荒地生产潜力:假设高投入水平下耕地覆膜滴灌达到 100%,调水垦荒达到 100%,10 km 地面精度下 $SL \leq 1.9^\circ$ 的宜农荒地全部得到开发,2200 年农作物经济产量干重达到 160.1 亿 t;中投入水平下耕地覆膜滴灌达到 75%,调水垦荒达到 75%, $SL \leq 1.1^\circ$ 的宜农荒地得到开发,2200 年农作物经济产量干重达到 134.6 亿 t;低投入水平下耕地覆膜滴灌达到 50%,调水垦荒达到 50%, $SL \leq 0.3^\circ$ 的宜农荒地得到开发,2200 年农作物经济产量干重达到 94.7 亿 t。

对不同消费水平的界定:假设低消费水平为维持 2017 年人均消费农作物干重 686.9 kg 不变;中消费水平以中投入下 2200 年产量达到 134.56 亿 t 和年均增长 0.521% 为消费目标,按人均消费水平增长对食物消费的贡献比例为 29.8% 计算,人均消费年均增长率为 0.155%,2200 年人均消费农作物干重 912.6 kg;若在高投入条件下计算中消费水平,以 2200 年产量达到 160.15 亿 t 和年均增长 0.616% 为消费目标,按照人均消费贡献率为 29.8%,年均增长

表 3 分大洲分坡度段的宜农荒地面积
Table 3 Area of wasteland suitable for agriculture by continents and slope types

大区	面积/亿 ha				占比/%		
	缓坡	中坡	陡坡	总和	缓坡	中坡	陡坡
中北美洲	0.745	1.022	0.445	2.212	33.68	46.18	20.14
南美洲	1.090	1.211	0.593	2.895	37.66	41.85	20.49
非洲	1.587	3.148	1.632	6.367	24.92	49.45	25.63
大洋洲	0.832	1.203	0.350	2.384	34.89	50.44	14.67
欧洲	0.324	0.414	0.236	0.974	33.26	42.51	24.23
亚洲北部	1.079	1.523	0.737	3.339	32.32	45.62	22.06
亚洲南部	0.283	0.346	0.233	0.861	32.84	40.16	27.00
总计	5.940	8.867	4.226	19.033	31.21	46.59	22.20

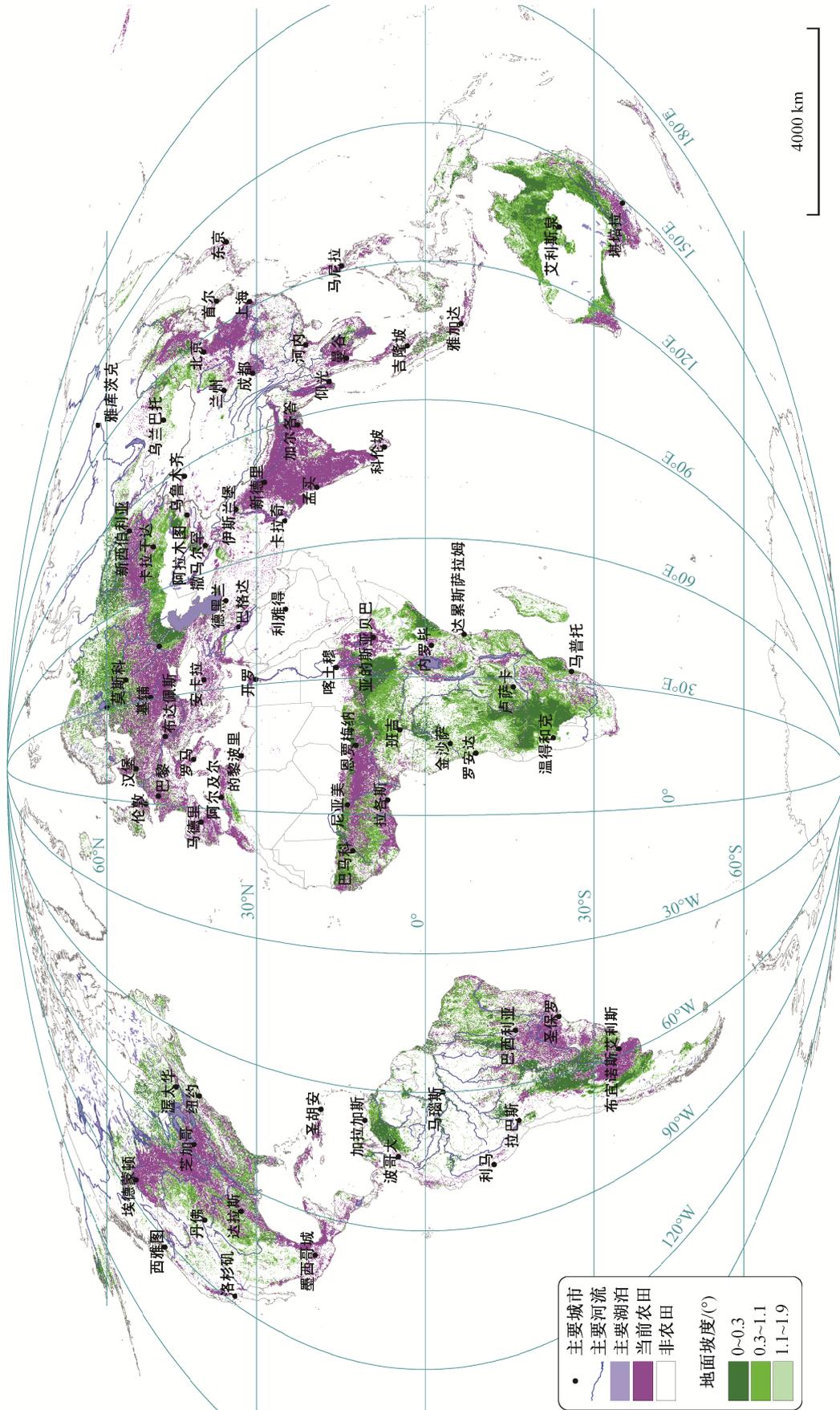


图 4 全球宜农荒地地面坡度
Fig. 4 Ground slopes of the world's wasteland suitable for agriculture

率为 0.184% 计算, 2200 年人均消费农作物干重为 961.1 kg, 比低消费方案增加 274.2 kg, 高消费水平则定义为在此高投入中消费基础上再增加 274.2 kg, 达到 1235.3 kg (表 4)。

根据投入的 3 种情景和消费的 3 种情景, 可组合为 2200 年的 9 种人口承载力结果, 承载力最高为高投入低消费情景, 承载 233.1 亿人口; 最低为低投入高消费情景, 承载 76.7 亿人口。根据一般的经济规律, 全球经济增长刺激食物消费增加, 从而导致农业投入增长, 促进农业生产发展, 满足全球的农产品消费需求; 农业资源贫乏的国家可以通过国际贸易, 从农业资源丰富的国家获得农产品, 弥补农产品的短缺, 促进农产品消费增长。在经济发展刺激食物消费, 食物消费驱动农业生产的经济规律驱动下, 3 种低消费情景和高消费低投入情景出现的可能性最小, 其余 5 种情景的人口承载力从大到小依次为: 高投入中消费情景, 承载 175.5 亿人口; 中投入中消费情景, 承载 147.5 亿人口; 高投入高消费情景, 承载 129.6 亿人口; 中投入高消费情景, 承载 108.9 亿人口; 低投入中消费情景, 承载 103.8 亿人口(表 5)。

本文认为, 在农业资源开发投入适度、兼顾环境保护和全球生态平衡以及适度地保留超远期发展空间的农业可持续发展原则下, 中投入中消费方案对自然资源的开发较为适度, 人口承载力高, 全球经济增长速度适中, 是最符合实际和可能性最大的方案; 中投入高消费方案对自然资源的开发也适度,

表 4 未来不同投入水平下农作物经济产量和人均消费水平
Table 4 Economic crop yield and per capita food consumption level under different input levels in the future

年份	食物产量/亿 t			人均消费/kg		
	低投入	中投入	高投入	低消费	中消费	高消费
1961	14.5	14.5	14.5	470	470	470
1975	20.9	20.9	20.9	512	512	512
1990	29.6	29.6	29.6	560	560	560
2000	35.2	35.2	35.2	573	573	573
2010	44.5	44.5	44.5	646	646	646
2017	51.9	51.9	51.9	687	687	687
2030	58.4	62.3	65.5	687	739	762
2050	66.4	78.3	86.5	687	799	862
2070	74.4	90.3	105.1	687	839	942
2100	83.4	105.3	123.1	687	869	1032
2150	92.4	124.3	148.1	687	899	1157
2200	94.7	134.6	160.1	687	913	1235

表 5 5 种可能的投入消费组合下全球人口承载力
Table 5 Global population carrying capacity under 5 possible input and consumption combinations

年份	全球人口承载力/亿人				
	低投入	中投入	中投入	高投入	高投入
	中消费	中消费	高消费	中消费	高消费
1961	30.9	30.9	30.9	30.9	30.9
1975	40.8	40.8	40.8	40.8	40.8
1990	53.0	53.0	53.0	53.0	53.0
2000	61.5	61.5	61.5	61.5	61.5
2010	68.8	68.8	68.8	68.8	68.8
2017	75.5	75.5	75.5	75.5	75.5
2030	79.0	84.3	81.7	88.7	86.0
2050	83.1	98.0	90.8	108.3	100.4
2070	88.6	107.6	95.8	125.3	111.6
2100	95.9	121.1	102.0	141.7	119.3
2150	102.7	138.2	107.4	164.7	128.0
2200	103.8	147.5	108.9	175.5	129.6

全球经济增长速度较快, 可以保障人类生活富裕, 是最佳方案和人类发展的最终目标; 高投入高消费和高投入中消费方案均过度开发地球资源, 对环境的破坏较严重, 可持续性差; 低投入中消费方案过分注重环境保护, 人口承载力低, 全球经济增长速度较慢, 可能性相对较小。

仅从投入角度来分析, 由于在农业资源开发中, 推广覆膜滴灌、建设跨流域调水工程和全面开垦宜农荒地均需要大量投资, 中投入方案可能性最大, 也最可行。根据中投入中消费方案, 全球农作物经济产量在 2017 年 51.86 亿 t 的基础上平均每年增长 0.521%, 2200 年达到 134.6 亿 t。按照增长贡献率为 29.8% 不变计算, 人均农作物消费量(产量)年均增长 0.155%, 2200 年达到 913 kg/人, 则地球可承载人口总量为 147.5 亿。中投入中消费方案与 FAO 预测的人口数最相符, 2050 年和 2100 年人口承载力分别为 98.0 亿和 121.1 亿人, 分别是 FAO 预测人口值的 100.25% 和 108.16%, 显示中投入中消费情境下地球承载力将不断提升, 人类的食物保障能力将不断增强。高消费是收入进一步提高的结果, 需要通过中消费阶段过渡, 若 2100 年全球开始从中投入中消费向中投入高消费转变, 世界总人口数量开始下降, 地球最大人口承载力或许仅为 121.1 亿人; 到 2200 年实现中投入高消费, 人口承载力降至 108.9 亿人, 达到稳定的可持续状态, 十分接近 FAO 预测的 2100

年全球人口数 112.0 亿, 达到预测值的 96.4%。

4 结论与对策建议

本研究主要结论如下。

1) 人口密度分布与经济活动存在耦合关系, 从渔猎业、放牧畜牧业和农业, 到城镇化区的第二、三产业, 人口密度大致存在十倍递增法则, 大城市扩张和食物消费的增长带来城镇建成区扩张, 城郊耕地流失, 驱动农业区向放牧畜牧业区扩张, 放牧畜牧业区向狩猎采集业区扩张, 从而导致全球资源开发程度普遍提高。

2) 农耕区人均产量与经济发展和城镇化水平密切相关, 发达国家即使耕地资源缺乏, 农村地区人均产量也普遍较高, 如日本的北海道。城镇化率低造成发展中国家农村地区人均产量低, 陷入马尔萨斯陷阱, 如大部分非洲国家和印度。

3) 世界宜农荒地开发潜力最大的地区是非洲、南美洲和亚洲北部, 较容易开发的地区是南美洲、大洋洲, 最难开发的地区是非洲和亚洲南部。25 个宜农荒地集中连片的平坦地区分布于非洲、南美洲、北美洲和澳洲, 中国有 4 处, 集中于东北和内蒙古中东部地区。

4) 在中投入中消费情景下, 2100 年全球农业资源人口承载力为 121.1 亿人, 约为目前全球总人口 (75.5 亿) 的 1.60 倍。考虑到经济发展带来的消费增长, 人类食物消费由中消费向高消费发展, 2200 年地球人口承载力为 108.9 亿人, 约为目前全球总人口的 1.44 倍。

根据上述结论, 本文提出以下保障我国和发展中国家食物安全的对策建议。

1) 中国和发展中国家未来的经济发展将进一步促进全球农产品贸易和农业资源开发, 南亚 3 个人口大国的经济发展和农业资源丰富的非洲国家的农业开发或将成为未来全球关注的焦点。增加农业投入, 高效地利用农业资源, 发展农产品国际贸易, 是未来保障食物安全的基本策略。这些地区应大力发展内河航运和铁路运输, 促进农产品国内和国际贸易。

2) 通过发展农业生产提升食物安全水平的路径有两条: 提高单位耕地面积产量和扩大耕地面积。前者包括适当地调整农业种植结构, 发展测土施肥和水肥一体化的高效节水灌溉, 培育推广优良农作物品种, 提高农业机械化水平和农业劳动生产效率;

后者包括兼顾环境保护, 合理开发土地资源和水资源, 与高效节水灌溉技术相结合, 开垦宜农荒地, 实现农业可持续发展。

3) 发达国家解决粮食安全问题的经验值得中国和发展中国家借鉴, 即通过发展经济和加速城镇化进程来提高收入水平, 实现农业规模化经营。这是各国解决粮食安全问题的必由之路。收入水平提高后, 可以通过农产品国际贸易解决国内生产不足的问题; 通过提高城镇化率, 扩大农业经营规模, 从而增加规模效益, 提高农业劳动生产率和农民收入, 缩小城乡居民收入差别。

4) 粮食作物的经济系数一般高于经济作物, 发展中国家经济作物占比较大, 是历史上国际社会农业大分工的结果, 有利于提高农民收入水平。发展中国家的农业发展方向应是适度开发丰富的农业资源, 增加粮食作物面积, 大力推广现代农业生产技术, 逐步提高农作物单产和经济系数。

5) 作为人均农业资源贫乏而农业生产技术发达的人口大国, 中国应加强与农业资源丰富的发展中国家(如南美洲、亚洲北部、东南亚和非洲国家)的农业技术合作, 通过国际农业投资, 建设农业基础设施, 提高当地的农业生产技术水平, 开发利用当地的农业资源, 以期减少全球饥饿人口, 保障发展中国家的食物安全。

参考文献

- [1] FAO, IFAD, UNICEF, WFP and WHO. The state of food security and nutrition in the world 2018: building climate resilience for food security and nutrition [EB/OL]. (2018-09) [2018-10-15]. <http://www.fao.org/3/I9553EN/i9553en.pdf>
- [2] von Grebmer K, Bernstein J, Hammond L, et al. Global hunger index: forced migration and hunger [EB/OL]. (2018-10) [2018-12-15]. <https://www.globalhungerindex.org/pdf/en/2018.pdf>
- [3] Helmut L. Primary production: terrestrial ecosystems. *Human Ecology*, 1973, 1(4): 303-332
- [4] 张允芳. 发展中国家解决粮食生产的出路——应用科技提高产量. *世界经济研究*, 1986(2): 42-46
- [5] Dyson T. 世界人口增长与粮食供应. 仕琦, 译. *国际社会科学杂志*. 1995(3): 65-87
- [6] IIASA, FAO. Global agro-ecological zones (GAEZ v3.0) [EB/OL]. (2012-05) [2018-11-15]. http://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/13290/1/GAEZ_Model_Documentation.pdf
- [7] Fischer G, Nachtergaele F, Prieler S, et al. Global

- agro-ecological zones assessment for agriculture (GAEZ) [EB/OL]. (2018) [2018-10-15]. <http://www.fao.org/nr/gaez/en/>
- [8] Brown L R. Who will feed China?. *World Watch*, 1994, 7(5): 10-19
- [9] 赵文武. 世界主要国家耕地动态变化及其影响因素. *生态学报*, 2012, 32(20): 6452-6462
- [10] Barretto A G O P. Agricultural land-use expansion dynamics in Brazil [D]. San Paulo: University of San Paulo, 2013
- [11] 张小瑜. 从世界粮食市场变化趋势看中国粮食安全. *农业展望*, 2014(2): 46-51
- [12] 李文华, 成升魁, 梅旭荣, 等. 中国农业资源与环境可持续发展战略研究. *中国工程科学*, 2016, 18(1): 56-64
- [13] 胡琼, 吴文斌, 项铭涛, 等. 全球耕地利用格局时空变化分析. *中国农业科学*, 2018, 51(6): 1091-1105
- [14] 吴朝阳. 国际粮食市场格局演化与我国的策略选择. *国际贸易*, 2014(6): 16-20
- [15] 倪洪兴. 世界粮食安全形势及对我国的启示. *中国党政干部论坛*, 2014(9): 92-95
- [16] 王溶花, 曾福生. 世界粮食贸易格局的演变及发展趋势分析. *世界农业*, 2015(2): 94-98
- [17] 杨晓东. 危机后世界粮食贸易发展及其对中国粮食安全的影响. *内蒙古社会科学(汉文版)*, 2017, 38(3): 120-124
- [18] 许世卫, 王禹, 潘月红, 等. 全球主要粮食生产与贸易格局演变分析及展望. *农业展望*, 2018(3): 73-87
- [19] FAO. The future of food and agriculture alternative pathways to 2050 [EB/OL]. (2018) [2018-12-15]. <http://www.fao.org/3/18429EN/i8429en.pdf>
- [20] 尤·李比希(Justus von Liebig). 化学在农业和生理学上的应用. 刘更另, 译. 北京: 中国农业出版社, 1983
- [21] Snyder J P, Voxland P M. An album of map projections. U. S. Geological Survey Professional Paper 1453. Washington, DC: United States Government Printing Office, 1989
- [22] Thiessen A H. Precipitation averages for large areas. *Monthly Weather Review*, 1911, 39(7): 1082-1084
- [23] Latham J. Global land cover — SHARE (GLC-SHARE) [EB/OL]. (2013) [2018-11-15]. <http://www.fao.org/geonetwork>
- [24] 国土资源部国务院第二次全国土地调查领导小组办公室. 中华人民共和国土地利用图(1:400 万). 北京: 地质出版社, 2014
- [25] Arino O, Ramos J, Kalogirou V, et al. Globcover 2009 // Proceeding of the Living Planet Symposium. Bergen: ESA, 2010: 686-689
- [26] 梁书民, 于智媛. 用经验径流系数推算全球径流深度分布场. *干旱区研究*, 2018, 35(1): 1-11
- [27] 梁书民, 于智媛. 基于 GIS 和迈阿密模型的全球灌溉需水量. *干旱地区农业研究*, 2019, 37(3): 96-103
- [28] FAO. Faostat [EB/OL]. (2018) [2018-11-15]. <http://www.fao.org/faostat/en/#home>
- [29] Doxsey-Whitfield E, MacManus K, Adamo S B, et al. Taking advantage of the improved availability of census data: a first look at the gridded population of the world. *Papers in Applied Geography*, 2015, 1(3): 1-9
- [30] Siebert S, Henrich V, Frenken K, et al. Global map of irrigation areas version 5 [EB/OL]. (2013) [2017-12-15]. <http://www.fao.org/geonetwork/srv/en/metadata.show?id=5020&currTab=distributio>
- [31] Hijmans R J, Cameron S, Parra J. WorldClim, version 1 [EB/OL]. (2005) [2016-01-15]. <http://www.worldclim.org/>
- [32] Jarvis A, Reuter H I, Nelson A, et al. Hole-filled SRTM for the globe, version 4 [EB/OL]. (2008) [2017-12-15]. <http://srtm.csi.cgiar.org>
- [33] Patterson T, Kelso N V. Natural earth [EB/OL]. (2009) [2017-12-15]. <http://www.naturalearthdata.com/>
- [34] Center for International Earth Science Information Network (CIESIN), Columbia University. Gridded population of the world, version 4 (GPWv4): administrative unit center points with population estimates [EB/OL]. (2015) [2018-07-15]. <http://dx.doi.org/10.7927/H4VH5KS4>
- [35] Lindeman R L. The trophic-dynamic aspect of ecology. *Ecology*, 1942, 23(4): 399-418
- [36] Notestein F W. Problems of policy in relation to areas of heavy population pressure. *Milbank Memorial Fund Quarterly*, 1944, 22(1): 424-444
- [37] Malthus T R. An essay on the principle of population 1798. Ann Arbor: University of Michigan Press, 1968
- [38] 梁书民, Richard Greene, 朱立志, 等. 全球大型跨流域调水工程及水资源农业开发潜力. *水资源与水工程学报*, 2019, 30(5): 236-246
- [39] Hudson J C. Goode's world atlas. 20th ed. New York: Rand McNally, 2000: 24-25