

中国宜能非粮地资源研究方法 with 适宜性评价指标

刘奇颀^{1,3} 孙川东^{1,3} 张宝贵^{2,3} 谢光辉^{1,3*}

(1. 中国农业大学 农学与生物技术学院,北京 100193;

2. 中国农业大学 资源与环境学院,北京 100193;

3. 国家能源非粮生物质原料研发中心,北京 100193)

摘要 就近年来中国宜能非粮地研究方法的合理性进行分析,并确定各适宜性指标的适宜范围。首先总结利用土壤调查统计资料和应用遥感数据及地理信息系统(Geographic Information System,GIS)获取宜能非粮土地资源的方法,汇总这2个方法所用的调查统计资料和数据库,评价研究方法及其所用数据库的合理性。然后,讨论前人研究结果,提出更完善的宜能非粮地的适宜性指标评价体系,包括地面坡度、有效土层厚度、土壤质地、土壤碱化度、土壤含盐量、无霜期、 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 年积温、水分条件、排水条件、集中连片条件、生态条件和污染超标条件等,最后分析确定各指标适宜范围。

关键词 边际地;宜能非粮地;土地调查;遥感与GIS;评价指标

中图分类号 S 216.2; Q 77

文章编号 1007-4333(2015)02-0011-10

文献标志码 A

Methodology and certification criteria of non-food land suitable for energy plant production in China

LIU Qi-qi^{1,3}, SUN Chuan-dong^{1,3}, ZHANG Bao-gui^{2,3}, XIE Guang-hui^{1,3*}

(1. College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

3. National Energy R&D Center for Non-food Biomass, Beijing 100193, China)

Abstract Using proper methodology to determine the suitable land resource is crucial to the development of non-food energy plants production. This paper reviewed the methodology and suitability evaluation index of non-food land suitable for energy plant production in China. A method to get the resource of non-food land suitable for energy plant production was summarized by combining both soil survey statistic data and remote sensing data obtained from Geographic Information System (GIS). All data were collected and the research method and the database were further evaluated. After discussed the previous research, a more perfect suitability evaluation system of non-food land suitable for energy plant production was put forward after discussed the previous research. The system included surface slope, effective soil depth, soil texture, soil alkalization degrees, soil salinity, frost-free season, $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ year accumulated temperature, water condition, drainage condition, land concentrated condition, ecological condition and exceeding pollution index. And the value range of each index was identified.

Key words marginal land; non-food land suitable for energy plant production; land survey; remote sensing and GIS; evaluation criteria

发展高效规模化非粮能源植物生产,是建立生物质原料供应体系的重要内容^[1]。中国人均土地资

源少,当前土地利用的核心目标是保证国家粮食安全,在不影响粮食安全条件下,可用于能源植物生

收稿日期:2014-08-29

基金项目:国家能源局能源节约和科技装备司项目(科技司函[2012]32号);河南天冠企业集团有限公司资助

第一作者:刘奇颀,硕士研究生,E-mail:niuniu_chul@126.com

通讯作者:谢光辉,教授,主要从事非粮生物质原料和能源植物研究,E-mail:xiagh@cau.edu.cn

产的土地资源研究受到广泛重视。笔者综述了近年前人研究中国宜能生产用地的主要方法,在总结前人宜能非粮地适宜性指标体系研究结果的基础上,提出更合适的适宜性指标,旨在为进一步研究宜能非粮地相关标准、资源及其利用提供理论依据。

1 利用土地调查统计资料获取宜能非粮地资源

我国宜能非粮地资源的研究是从利用土地资源

调查统计资料开始的,可用的土地调查统计资料见表1。严良政等^[2]最早使用2000—2003年进行的国土资源大调查耕地后备资源调查结果^[3],剔除其中的沼泽和苇地,另加上现有能源林资源^[4]得出实际土地资源总量。然后该研究选取后备耕地资源中,坡度小于15°的荒草地、轻度盐碱地和可围垦滩涂3类立地条件最好的土地,依据土地资源集中连片标准^[3],确定可用于种植生物乙醇能源作物的土地资源。紧接着,不少研究^[5-9]都采用耕地后备资源调查结果或引用严良政等^[2]的报导。

表1 研究宜能非粮地资源可用的土地调查统计资料

Table 1 Land survey statistic data for evaluation of non-food land suitable for energy plant production

调查年份 Survey year	组织单位 Organization	土地调查项目名称 Land survey project name	调查结果文献 Literature of survey results	研究宜能非粮地资源 引用该调查成果的报导 Articles using this survey results
1956—1978	中国科学院、黑龙江省	各地荒地资源考察	中国宜农荒地资源 ^[10]	
1980—1999	国务院	全国土地资源调查	中国土地资源 ^[11]	[5,12]
1990—1994	原国家农业区划委员会	“四荒”资源调查		
1997	原国家土地管理局	农用地后备资源调查		
1999—2003	国家林业局	第六次全国森林资源清查	全国森林资源统计 1999—2003 ^[13]	[2,5]
1999—2009	国土资源部	全国耕地质量等级调查与评定	中国耕地质量等级调查与评定 ^[14]	
2002—2003	国土资源部	国土资源大调查耕地后备资源调查	中国耕地后备资源 ^[3]	[2,5-8]
2004—2008	国家林业局	第七次全国森林资源清查	第七次全国森林资源清查及森林资源状况 ^[15]	[12]

石元春等^[5]除应用耕地后备资源调查结果^[3]外,还计入宜林后备土地、现有能源林以及边际性农地资源。其中,宜林后备土地(包括荒山荒地、火烧迹地和沙荒地)和能源林数据都来源于《全国森林资源统计 1999—2003》^[13],还应用1980—1999年进行的全国土地资源调查结果^[11]评估边际性农地资源。3年后该作者发表的同类报告中^[12],根据当时最新公布的数据,即第七次全国森林资源清查及森林资源状况^[15],更新了现有能源林的统计数据。

此外,近20年内,比较早的土地资源调查,有1990—1994年原国家农业区划委员会组织的“四荒资源调查”,以及1997年原国家土地管理局组织的

农用地后备资源调查,但是,无法获得这2个调查的结果。还有中科院组织的20世纪50—70年代的各省市荒地资源考察,以及黑龙江省组织的黑龙江省荒地资源考察,石玉林等^[10]根据以上考察编写了《中国宜农荒地资源》。1999—2009年期间,国土资源部组织全国耕地质量等级调查与评定,依据这项历时10年的调查结果,出版了《中国耕地质量等级调查与评定》及各省卷系列^[14],该结果有利于研究低等级质量的耕地作为宜能非粮地资源。但是,当前对宜能非粮地资源的研究,还没有应用这一研究成果。

农业部于2007年组织各级农村能源管理部门,以县级为单位对适宜能源作物种植的边际地数量、

质量、类型和利用现状进行调查。这项调查的详细数据未见公布，寇建平^[16]根据主要调查结果，发表了我国宜能荒地资源及其分布的研究成果。在前人研究中，除只研究适宜草本能源植物的适宜土地面积的报告^[6-8]外，虽然这一研究并没有用表 1 所列的任何一次土地资源调查数据，根据谢光辉等^[17]的综述，寇建平^[16]研究得出的宜能非粮地面积是最少的，为 3 420 万 hm^2 ，也是最接近实际的。换言之，大多数研究者过高地估计了中国宜能非粮地的面积。

2 应用遥感数据与 GIS 方法获取宜能非粮地资源

应用遥感和地理信息系统 (Geographic

Information System, GIS) 的方法研究土地资源已是很成熟的技术^[18-21]，在宜能非粮地资源研究上也有不少应用遥感和 GIS 的方法^[22-28]。这些研究都必须建立空间属性数据库，包括土地利用数据、地形数据、气象数据和土壤数据 4 种基本数据类型 (表 2)。其中，土地利用数据的来源比较一致，除冯正飞^[22]外，其他研究采用的数据都来自于中国科学院 1:10 万土地利用数据集^[23-27]。王小兰等^[28]应用了 1:10 万土地利用数据集的解译来源 Landsat TM/ETM 遥感影像数据。土壤数据来源也比较一致，使用最多的是全国第二次土壤普查的资料^[23,27]；其他数据来源还有地球系统科学数据贡献该平台的数据^[28]，以及联合国世界土壤图图例单元 (FAO / UNESCO) 中的东亚土壤质地数字数据^[22] (表 2)。

表 2 应用 GIS 和遥感方法研究宜能非粮地资源应用的数据库

Table 2 Database for evaluation of non-food land suitable for energy plant production using remote sensing and GIS

数据类型 Data types	数据库名称 Name of database	数据出处 Data source	研究宜能非粮地资源引用 该数据库的报导 Articles using this database
土地利用数据 Land use data	1:10 万土地利用数据集	中国科学院地理科学与资源研究所、 中国科学院资源环境科学数据中心	[23-27]
	1:50 比例尺分省土地利用图	全国土地第二次调查	[22]
	Landsat TM/ETM 遥感影像数据	美国航空航天局	[28]
地形数据 Topographic data	中国 1:25 万数字高程模型	国家测绘局	[23-24]
	SRTM-DEM 重采样数据	美国太空总署和国防部国家测绘局	[28]
	全国 1:25 万地图数据库	国家测绘局	[27]
	全国 1:100 万数字高程模型	国家测绘局	[26]
	内蒙古自治区 ASTER G-DEM 数据	美国航空航天局	[22]
气象数据 Meteorological data	气象台站观测记录	气象局	[23,27]
	中国科学院资源环境科学数据中心 格网系列数据集	中国科学院资源环境科学数据中心	[24,26]
	四川省 52 个基本地面气象观测站监 测数据	中国气象科学数据共享服务网	[28]
	中国农业科学院农业自然资源与农 业区划研究所数据	中国农业科学院农业自然资源与农 业区划研究所	[22]
土壤数据 Soil data	《中国土壤》、《中国土种志》等 (原文不详)	全国第二次土壤普查	[23,27]
		地球系统科学数据贡献平台	[28]
		东亚土壤质地数字数据	FAO/UNESCO

然而,地形数据和气象数据来源差别较大,除吴伟光等^[23]和庄大方等^[24]的高程数据都来源于国家测绘局1998年发布的中国1:25万数字高程模型外,其他研究的高程数据来源各不相同(表2)。吴伟光等^[23]和尹芳等^[27]使用的气象数据相同,但采用记录的年份不同;此外,欧阳益兰等^[26]和庄大方等^[24]采用的也是同一气象数据,来自中国科学院资源环境科学数据中心格网系列数据集。其他数据来源还有中国气象科学数据共享服务网^[28]和中国农业科学院农业自然资源与农业区划研究所1995年的数据^[22]。

以上数据库中,就土地利用数据来说,1:10万土地利用数据集是基于美国陆地卫星LandsatTM和中巴资源卫星遥感影像,进行人工解译得到的覆盖全国的土地利用图,数据总体精度可达92%以上,该数据集包括了6个一级地类,25个二级地类,是目前应用较多的土地利用数据库。1:25万数字高程模型数据库和1:100万数字高程模型数据库,

分别属于国家基础地理信息系统数据库1:25万数据库和1:100万数据库,是面向全社会各类用户、应用面最广的公益性地理信息系统,具有权威代表性。土壤普查是经国务院批准开展的以全面清查土壤资源为目的的调查工作,因此,以土壤普查成果作为土壤数据来源是合理的。而气象数据主要都是气象站观测数据,可根据是否方便获取选择数据来源。

3 现有宜能非粮土地适宜性指标体系研究

前人研究宜能非粮地的过程中提出其适宜性评价指标(表3和4),还提出能源植物木薯(*M. utilissima Pohl*)^[27]、甜高粱(*Sorghum bicolor* (L.) Moench)^[22]、菊芋(*Helianthus tuberosus* L.)^[24]、象草(*Pennisetum purpureum* Schum.)^[26]、麻疯树(*Jatropha carcas* L.)^[23]、黄连木(*Pistacia chinensis* Bunge)^[24]及油桐(*Vernicia fordii* (Hemsl.))^[28]适宜的种植土地指标(表5)。为得到更完善的适宜性评价指标,结合前人研究讨论如下。

表3 寇建平^[16]确定的宜能荒地分等级评价指标

Table 3 Evaluation criteria of different grades of wasteland suitable for energy identified by KOU^[16]

指标 Index	适应区域 Appropriate area ^a	宜能荒地等级 Grade of wasteland suitable for energy			非宜农荒地 Non wasteland suitable for energy
		I First	II Second	III Third	
坡面坡度/(°) Slope	所有地区	<7	≥7~15	≥15~25	≥25
土层有效 厚度/cm Effective soil depth	华南区、四川盆地 和长江中下游区	>70	70~50	50~20	<20
	云贵高原区	>60	60~30	30~10	<10
	黄淮海区和东北区	>80	80~50	50~30	<30
	黄土高原区、内蒙 古半干旱区和西北 干旱区	>100	100~60	60~30	<30
	青藏高原区	>100	100~50	50~30	<30
土壤质地 Soil texture	所有地区	壤土	粘土、沙壤土	重粘土、砂土	砂质土、砾质土
土壤盐 碱化度/% Degree of soil salinization	黄淮海区、东北区 和黄土高原区	无盐碱化(含盐总 量<0.3, Cl ⁻ <0.02, SO ₄ ⁻ <0.1)	轻盐碱化(含盐总 量0.3~0.5, Cl ⁻ 0.02~0.04, SO ₄ ⁻ 0.1~0.3)	中强度盐碱化(含 盐总量0.5~2.0, Cl ⁻ 0.04~0.20, SO ₄ ⁻ 0.3~0.6)	盐土(含盐总量> 2.0, Cl ⁻ >0.20, SO ₄ ⁻ >0.6)
	青藏高原区和西北 干旱区	无盐碱化或轻盐碱 化(含盐总量<0.5, Cl ⁻ <0.04, SO ₄ ⁻ < 0.30)	中度盐碱化(含盐 总量0.5~1.0, Cl ⁻ 0.04~0.10, SO ₄ ⁻ 0.30~0.40)	强度盐碱化(含盐 总量1.0~2.0, Cl ⁻ 0.10~0.20, SO ₄ ⁻ 0.40~0.60)	盐土(含盐总量 2.0, Cl ⁻ >0.20, SO ₄ ⁻ >0.60)

表 3(续)

指标 Index	适应区域 Appropriate area ^a	宜能荒地等级 Grade of wasteland suitable for energy			非宜农荒地 Non wasteland suitable for energy
		I First	II Second	III Third	
水分条件 Water condition	所有地区	旱作较稳定或有稳定灌溉条件的干旱、半干旱土地,有水源保证的南方田土	灌溉水源保证差的干旱、半干旱土地,水源保证差的南方田土	无水源保证,旱作不稳定的半干旱土地,无水源保证的南方田土	无灌溉水源保证,不能旱作的干旱土地
温度条件 Temperature condition	华南区、四川盆地和长江中下游区	亚热带作物正常发育	亚热带作物生长受一定影响	亚热带作物生长受严重影响	亚热带作物不能生长
	云贵高原区	低海拔或中海拔地区	较高海拔地区,耐寒作物不稳定	高海拔地区,耐寒作物不稳定	高海拔地区,耐寒作物不能发育
	黄土高原区、西北干旱区和东北区	耐寒作物生育稳定	耐寒作物生育不稳定	耐寒作物很不稳定	/
	青藏高原区		≥10 °C 积温为 700 ~1 400 °C,耐寒作物稳定	≥10 °C 积温 < 700 °C,耐旱作物很不稳定	耐寒作物不能生长

注:a:原文中未见区域的范围和分区依据。

Note:a: There are no reference of area coverage and distribution in the original paper.

表 4 温明炬等^[3]、王芳等^[31]和庄大方等^[24]提出的宜能非粮地适宜性评价指标

Table 4 Suitability evaluation criteria of non-food land suitable for energy plant production suggested by WEN^[3], Wang^[31] and ZHUANG^[24]

指标 Index	可开垦耕地后备资源 ^a 温明炬等 ^[3] Source of reclaimable cultivated land	广东省边际土地 ^b 王芳等 ^[31] Marginal land in Guangzhou	宜农边际土地 庄大方等 ^[24] Marginal land suitable for farmland
海拔/m Elevation		≤500	
地面坡度/(°) Slope	<25	≤25	<25
沙丘起伏程度 Degree of sand dune fluctuation	沙土包高度<2 m, 密度>40%		
地表粗糙度 Terrain roughness		≤1.368 8	
有效土层厚度/cm Effective soil depth	>50	≥20	北方区≥30,南方区≥20
土壤质地 Soil texture	石砾含量<15%	壤土、粘土、砂壤土、重黏土、砂土	
≥10 °C 年积温/(°C · d) ≥10 °C Accumulated temperature	能满足作物生长要求	耐寒作物很不稳定	
年降水量/mm Annual precipitation	旱作>400,或水源保证 程度好能灌溉	≥160 ^c	
地下水埋深/m Groundwater depth	>1		
距道路距离/km Distance from the road		≤8.333	

注:a 石元春等^[5]将可开垦耕地后备资源^[3]中条件相对较好的宜林地和宜农地,作为可种植能源植物的边际性土地的一个种类。b 本表所列为其低开发潜力边际土地评价指标的下限。c 指作物生育期降水量。

Note:a. Shi et al. defined forest land suitable for energy and cultivated land suitable for energy which are in good condition in reclaimable cultivated land reserves as a variety of marginal land suitable for growing energy plants. b. This table showed the minimum standards of evaluation index of marginal land with lower exploring potential. c. Means the precipitation during crop growing periods.

表5 不同能源植物对土地适宜性评价指标

Table 5 Land suitability evaluation criteria of different energy plant

植物 Plant	指标 Index	适宜 Appropriate	次适宜 Less appropriate	来源 Source
木薯 Cassava	海拔/m	≤1 500	1 500~2 000	[27]
	地形坡度/(°)	≤15	15~25	
	土壤有机质含量/%	≥3.5	1.5~3.5	
	土壤质地(壤土体积比)/%	≥30	10~30	
	有效土层厚度/cm	≥75	30~75	
	年均气温/°C	≥21	18~21	
	桑斯维特湿润指数	-33.3~100.0	-66.7~-33.3	
	年降水量/mm	1 000~2 000	600~1 000 或 2 000~6 000	
甜高粱 ^a Sweet sorghum	海拔/m	≤1 850	1 850~2 500	[22]
	地形坡度/(°)	≤15	15~25	
	土壤质地	壤土	粘土、砂壤土	
	≥10 °C年积温/(°C·d)	≥2 500	1 500~2 500	
	年降水量/mm	≥500	290~500	
菊芋 Jerusalem artichoke	地形坡度/(°)	<25		[24]
	土壤有机质含量/%	>1.5		
	有效土层厚度/cm	北方地区≥30, 南方地区≥20		
	≥0 °C年积温/(°C·d)	≥2 000		
	年降水量/mm	≥160		
	集中连片最小面积/hm ²	200		
象草 Grassiness	海拔/m	1 000~2 000	200~1 000 或 2 000~2 500 ^c	[26]
	地形坡度/(°)	<7	15~20	
	土壤质地	壤土、轻黏土/黏土、沙壤土	重黏土	
	有效土层厚度/cm	≥100	>50	
	年均气温/°C	15~18	0~14	
	年降水量/mm	>800	500~800	
麻疯树 Jatropha curcas	地形坡度/(°)	≤15	15~25	
	土壤有机质含量/%	≥3.5	1.5~3.5	
	土壤质地(壤土体积比)/%	≥30	10~30	
	有效土层厚度/cm	≥75	30~75	
	年均气温/°C	≥20	17~20	
	年均极端最低气温/°C	≥2	0~2	
	桑斯维特湿润指数 b	-33.3~100.0 ^b	-33.3~-66.7	
黄连木 Pistacia chinensis bunge	地形坡度/(°)	15	25	
	有效土层厚度/cm	60	30	
	年均气温/°C	11.5~15.9	5.8~11.5 或 15.9~28.4	
	年均极端最低气温/°C	≥-15	-26.5~-15	
	≥10 °C年积温/(°C·d)	≥3 800	1 180~3 800	
	年降水量/mm	400~1 300	1 300~1 900	
油桐 Vernicia fordii	海拔/m	<800	800~1 000	[28]
	地形坡度/(°)	<15	15~25	
	土壤 pH	6~7	5.5~6	
	年均气温/°C	16~18	14.5~16, 18~20	
	年空气相对湿度/%	70~85	60~70	
	年降水量/mm	900~1 300	750~900	
	1月均温/°C	2.4~8.1	1.5~2.4, 8.1~12.6	
	年日照时数/h	1 045~1 300	1 300~2 371	

注:a 内蒙古地区。b 原文为“100~33.3”,笔者认为此值有误,本表为根据毛飞等^[29]改正的数值。c 原文为“<200 或>2 500”,笔者认为有误,本表为笔者根据原文修改后的数值,但因无法联系到作者未得到作者同意。

Note:a: Inner Mongolia region. b: The value was “100~33.3” in the original, we thought that was wrong, so corrected the value according to Mao et al.^[29] in the table. c: The value was “<200 或>2 500 in the original”, we thought that was wrong, the value in the table was corrected according to the details of the original, but we did not obtain the consent because the author couldn't be contacted.

3.1 指标类别研究

有些研究选取海拔和地形坡度作为地形地貌的评价因子(表3、4和5),而寇建平^[16]、吴伟光^[23]和庄大方^[24]只考虑了地形坡度。考虑到难以确定草本和木本能源植物生长合适的海拔,因此仅选取地形坡度作为宜能非粮地地形地貌的评价因子。土壤指标中应用较多的是土层有效厚度和土壤质地,不再增加其他指标。

盐碱地是宜能非粮地的主要土地类型之一,前人研究仅有寇建平^[16]提出盐碱地作为评价指标内容。盐碱地也称盐渍土或盐碱土,包括盐化土和碱化土。但是,该研究仅以盐化分级规定盐碱化土壤,没有土地碱化指标。而且,所确定的无盐渍化、轻度、中度和强度土地盐化指标均不同于我国普遍采用的分级标准^[30-31],原文也没有给出依据。

气候因素包括作物生长发育必须的光、热和水。在能源植物土地适应性评价研究中,使用频率较高的气候指标是年平均气温和年降水量(表5),少数还应用积温指标。笔者认为积温比年平均温度存在更大的地域差异和时间变化,对植物生长的影响更加密切,因此选用 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温为温度指标。考虑可能的客观条件,将年降水量改为水分条件指标,同时增加无霜期作为热量指标。

前人^[2,5,24]研究中将集中连片作为评价指标,也符合能源工业对原料生产供应的需要特征。此外,土地的排水条件、生态环境和超标污染也应纳入宜能非粮地适宜性评价指标。

3.2 指标分区研究

寇建平^[16]首次系统地建立了宜能荒地适宜性基本指标体系,除地面坡度和土壤质地外,按不同地区确定土层有效厚度、土壤盐碱化度和温度条件(表3)。该研究虽然建立了不同地区的指标,但是原文没有地区划分的文献,读者无从知道地区划分的依据和各区域的边界。庄大方^[24]仅分南、北方确定土层有效厚度评价指标(表4)。温明炬^[3]只分区确定土地集中连片指标,王芳^[32](表4)以及其他建立土地适宜性评价指标的研究(表5)都没有进行分区。由于南、北方降雨量不同导致土壤水分含量不同,庄大方^[24]分南、北方建立土层有效厚度指标是合理的。此外,土壤盐化指标的分区也是必要的,但寇建平^[16]各区盐碱化度指标的建立也没有说明来源,无法直接引用。

4 本研究制定的宜能非粮土地适宜性评价指标体系

本研究宜能盐碱地的确认和分级,按我国普遍采用的土壤盐化分级(表6)^[30]和碱化分级标准^[33](表7),将强度盐化土作为可种植非粮能源植物的土地,即仅排除盐土(表6)。对碱化土壤将弱碱化和中碱化土壤作为可种植非粮能源植物的土地,即排除强碱化土壤和碱土(表7)。

因超标污染耕地有一定的特殊性,所以单独按照土壤环境质量标准(GB15618—1995)^[34]执行(表8)。

表6 我国土壤盐化分级指标^[29]

Table 6 Classification of soil salinity in China

盐渍土分区 Salinized soil partition	主要盐离子 Main salt ions	土壤盐质量分数/% Soil salinity				
		非盐渍化 Non salination	轻度 Mild	中度 Moderate	强度 Intensity	盐土 Saline soil
滨海地区、半湿润区 Coast, semihumid area	CO_3^{2-} 、 HCO_3^{-} 、 Cl^{-} 、 SO_4^{2-}	<0.1	0.1~0.2	0.2~0.4	0.4~0.6	>0.6
半干旱、干旱区 Semiarid, arid area	Cl^{-} 、 SO_4^{2-}	<0.1	0.1~0.2	0.2~0.4	0.4~1.0	>1.0
漠境、半漠境区 Desert, semi desert area	Cl^{-} 、 SO_4^{2-} (不富含石膏)	<0.2	0.2~0.3	0.3~0.5	0.5~1.0	>1.0
	Cl^{-} 、 SO_4^{2-} (富含石膏)	<0.2	0.2~0.4	0.3~0.6	0.5~2.0	>2.0

表7 中国土壤碱化分级^[33]

Table 7 Classification of soil alkalinization in China

分级 Classification	残余碳酸钠 cmol/kg Residual of sodium carbonate	酸碱度 pH	钠碱化度/% Degree of sodium alkalisation
非碱化土 Non alkali soil	<0.5	<8.5	<5
弱碱化土 Mild alkali soil	0.6~1.5	8.6~9.0	6~15
中碱化土 Moderate alkali soil	1.6~2.0	9.1~9.5	16~30
强碱化土 Intensity alkali soil	2.1~3.0	9.6~10.0	31~45
碱土 Alkali soil	>3.0	>10.0	>45

表8 一般农田、蔬菜地、茶园、果园和牧场污染超标指标^[34]

Table 8 Exceeding pollution criteria of general farmland, vegetable land, tea garden, orchard and pasture mg/kg

污染物 Pollutant	土壤 pH Soil		
	<6.5	≥6.5~7.5	≥7.5
镉 Cd	0.30	0.30	0.60
汞 Hg	0.30	0.50	1.00
砷 As 水田	30	25	20
砷 As 旱地	40	30	25
铜 Cu 农田等	50	100	100
铜 Cu 果园	150	200	200
铅 Pb	250	300	350
铬 Cr 水田	250	300	350
铬 Cr 旱地	150	200	250
锌 Zn	200	250	300
镍 Ni	40	50	60
六六六 Hexachloro cyclohexane		0.50	
滴滴涕 DDT		0.50	

注:各数值均为污染物最低指标。重金属(铬主要是三价)和砷均按元素量计,适用于阳离子交换量>5 cmol/kg的土壤,若≤5 cmol/kg,其标准值为表内数值的半数。六六六为4种异构体总量,滴滴涕为4种衍生物总量。水旱轮作地的土壤环境质量标准,砷采用水田值,铬采用旱地值。

Note: Values in the table stand for the minimum standards of pollutant. Heavy metal (Cr mainly indicates trivalent) and as all calculated as element, and appropriate for the soil with cation exchange capacity >5 cmol/kg, if the cation exchange capacity ≤5 cmol/kg, the standard value is half of the value in the table. Hexachloro cyclohexane are the total amount of four isomers, DDT are the total amount of four ramifications. Soil environmental quality standards of rice field-upland rotation, as adopt the paddy field value and Cr adopt the dry land value.

除上述单独执行的超标污染指标外,本研究对土层有效厚度、土壤盐化和集中连片指标进行分区,确定的宜能非粮地适宜性评价指标及其范围见表9。依据《土地利用现状调查技术规程》对

耕地坡度的分级,选取可准许开荒种植农作物的地面坡度下限,即<25°为宜能非粮地地面坡度评价指标。有效土层厚度应用庄大方等^[24]确定的分区和范围,北方区有效土层厚度≥30 cm,南方区

有效土层厚度 ≥ 20 cm。在土壤质地方面,前人研究多确定为壤土和粘土,较适宜的土地多为重黏土和沙壤土等(表 3、4 和 5),笔者认为应选取可用于生物生产的最低土壤质地为标准,即不属于砾质土或更粗质地的土地为宜能非粮地的土壤质地指标。根据主要农作物生长对积温的最低要

求^[35-36],确定适合非粮能源植物生长的无霜期为 ≥ 100 d, ≥ 10 °C 年积温按 $\geq 1\ 100$ °C · d(表 9)。对水分的指标要求为旱作时降水量 > 400 mm 或有灌溉条件^[35]。对于集中连片指标,以温明炬等^[3]的规定为基础,为易于操作进行简化,确定为东部地区 ≥ 20 hm²,中部和西部地区 ≥ 60 hm²。

表 9 本研究确定的宜能非粮地适宜性评价指标

Table 9 Suitability evaluation criteria of non-food land suitable for energy plant production identified by this study

指标 Index	范围 Range
地面坡度/(°) Slope	< 25
有效土层厚度 ^a /cm Effective soil depth	北方区 ≥ 30 , 南方区 ≥ 20
土壤质地 Soil texture	不属于砾质土和更粗质地,且岩石露头度 $< 2\%$
土壤 pH Soil pH	4.0~9.5
残余碳酸钠/(cmol/kg) Residual of sodium carbonate	< 2.0
钠碱化度/% Degree of sodium alkalisation	< 30
土壤含盐量 ^b /‰ Soil salinity	滨海和半湿润区 < 0.6 半干旱和干旱区 < 1 漠境和半漠境区(不富含石膏) < 1 漠境和半漠境区(富含石膏) < 2
无霜期/d Frost-free season	≥ 100
≥ 10 °C 年积温/(°C · d)	$\geq 1\ 100$
≥ 10 °C Accumulated temperature	
水分条件 Water condition	旱作时降水量 > 400 mm, 或有灌溉条件
排水条件 Drainage condition	有排水条件
集中连片条件 ^c Concentrated condition	东部 20 hm ² , 中部和西部 60 hm ² 平原区
生态条件 Ecological condition	不因开发导致土地退化或引起地质灾害

注: a: 北方区指大兴安岭、贺兰山脉、巴颜喀拉山脉以东,秦岭、淮河以北;南方区指秦岭和淮河以南,青藏高原以东地区。

b: 中国盐渍土分区^[30],滨海和半湿润区指“滨海湿润-半湿润海水浸渍盐渍区”、“东北半湿润-半干旱草原-草甸盐渍区”和“黄淮海半湿润-半干旱耕作草甸盐渍区”;半干旱和干旱区指“蒙古高原干旱-半漠境草原盐渍区”;漠境和半漠境区指“黄河中上游半干旱-半漠境盐渍区”、“甘、蒙、新干旱-漠境盐渍区”、“青、新极端干旱漠境盐渍区”和“西藏高寒漠境盐渍区”。c: 东部是指辽宁、北京、天津、山东、安徽、江苏、上海、浙江、福建、江西、广东和海南 12 个省,中部和西部是指其他 19 个省。

Note: a. The north area means the east of Great khingan, Helan Mountains, Bayan Har Mountains and the north of Qinling Mountains, Huaihe River. b. China salinized soil partition^[29], coast and semihumid region indicates “coast moist-semihumid seawater steep salt marsh area”, “northeast semihumid-semiarid prairie-meadow salt marsh area” and “Huang-Huai-Hai semihumid-semiarid farming meadow salt marsh area”; Semiarid and arid region indicates “Mongolian Plateau arid-semi desert prairie salt marsh area”; Desert and semi desert region indicates “upper and middle reaches of Yellow River semiarid-semi desert salt marsh area”, “Gansu, Mongolia, Xinjiang arid-desert salt marsh area”, “Qinghai, Xinjiang extreme arid desert salt marsh area” and “Tibet high cold desert salt marsh area”. c. The east area indicates 12 province including Liaoning, Beijing, Tianjin, Shandong, Anhui, Jiangsu, Shanghai, Zhejiang, Fujian, Jiangxi, Guangdong and Hainan, the middle and west area indicates the other 19 province.

参 考 文 献

- [1] 谢光辉. 非粮生物质原料体系研发进展及方向[J]. 中国农业大学学报, 2012, 17(6): 1-19
- [2] 严良政, 张琳, 王士强, 等. 中国能源作物生产生物乙醇的潜力及分布特点[J]. 农业工程学报, 2008, 24(5): 213-216
- [3] 温明炬, 唐成杰. 中国耕地后备资源[M]. 北京: 中国大地出版社, 2005: 38, 61-62
- [4] 周生贤. 中国森林资源报告[M]. 北京: 中国林业出版社, 2005
- [5] 石元春, 汪燮卿, 尹伟伦, 等. 中国可再生能源发展战略研究丛书-生物质能卷[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008
- [6] 《中国能源作物可持续发展战略研究》编委会. 中国能源作物可持续发展战略研究[M]. 北京: 中国农业出版社, 2009
- [7] 田宜水, 赵立欣, 孙丽英, 等. 农业生物质能资源分析与评价[J]. 中国工程科学, 2011, 13(2): 24-28
- [8] Tian Y S, Zhao L X, Meng H B, et al. Estimation of un-used land potential for biofuels development in (the) People's Republic of China[J]. Appl Energy, 2009, 86(S1): S77-S85
- [9] Tang Y, Xie J S, Geng S. Marginal land-based biomass energy production in China[J]. J Integr Plant Biol, 2010, 52(1): 112-121
- [10] 石玉林, 康庆禹, 赵存兴, 等. 中国宜农荒地资源[M]. 北京: 北京科学技术出版社, 1985
- [11] 李元. 中国土地资源[M]. 北京: 中国大地出版社, 2000: 151
- [12] 石元春. 中国生物质原料资源[J]. 中国工程科学, 2011, 13(2): 16-23
- [13] 国家林业局森林资源管理司. 全国森林资源统计(1999—2003)[M]. 北京: 中国林业出版社, 2005: 5-6
- [14] 国土资源部. 中国耕地质量等级调查与评定: 各省卷[M]. 北京: 中国大地出版社, 2009
- [15] 国家林业局森林资源管理司. 第七次全国森林资源清查及森林资源状况[J]. 林业资源管理, 2010(1): 1-8
- [16] 寇建平, 毕于运, 赵立欣, 等. 中国宜能荒地资源调查与评价[J]. 可再生能源, 2008, 26(6): 3-9
- [17] 谢光辉, 刘奇顺, 段增强, 等. 中国宜能非粮土地资源评价研究进展[J]. 中国农业大学学报, 2015, 20(2): 1-10
- [18] 陈松林. 基于GIS的荒地资源适宜性评价[J]. 福建地理, 2001, 16(1): 35-37
- [19] 白淑英, 张树文, 宝音, 等. 遥感和GIS在土地适宜性评价研究中的应用[J]. 水土保持学报, 2003, 17(6): 18-26
- [20] 聂倩, 闫利, 蔡元波. 基于遥感和GIS的土地适宜性评价[J]. 地理空间信息, 2009, 7(2): 28-30
- [21] 邱炳文, 池天河, 王钦敏, 等. GIS在土地适宜性评价中的应用与展望[J]. 地理与地理信息科学, 2004, 20(5): 21-23, 44
- [22] 冯正飞. 内蒙古宜能边际土地生产潜力和开发利用模式研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014
- [23] 吴伟光, 黄季焜, 邓祥征. 中国生物柴油原料树种麻疯树种植土地潜力分析[J]. 中国科学D辑: 地球科学, 2009, 39(12): 1672-1680
- [24] 庄大方, 江东, 刘磊. 能源植物发展潜力遥感信息获取与评价[M]. 北京: 气象出版社, 2013
- [25] Zhuang D F, Jiang D, Liu L, et al. Assessment of bioenergy potential on marginal land in China[J]. Renew Sust Energ Rev, 2011, 15(2): 1050-1056
- [26] 欧阳益兰, 刘洛, 段建南. 中国适宜发展象草的边际土地资源分析与评价[J]. 经济研究导刊, 2013(13): 256-258
- [27] 尹芳, 刘磊, 江东, 等. 中国西南地区木薯燃料乙醇发展潜力及对温室气体减排的影响[J]. 中国农业大学学报, 2013, 18(6): 18-26
- [28] 王小兰, 苏春江, 王海娥, 等. 能源植物油桐在四川省边际土地种植潜力评价[J]. 可再生能源, 2013, 31(8): 82-87
- [29] 毛飞, 孙涵, 杨宏龙. 干湿气候区划研究进展[J]. 地理科学进展, 2011, 30(1): 17-26
- [30] 王遵亲, 祝寿泉, 俞仁培, 等. 中国盐渍土[M]. 北京: 科学出版社, 1993: 130-132
- [31] 盐碱地[EB/OL]. (2014-05-29). <http://baike.baidu.com/view/41585.htm?fr=aladdin>
- [32] 王芳, 卓莉, 陈建飞, 等. 宜能边际土地开发潜力熵权模糊综合评价: 以广东省为例[J]. 自然资源学报, 2009, 24(9): 1520-1531
- [33] 全国土壤普查办公室. 中国土壤普查技术[M]. 北京: 农业出版社, 1992
- [34] 国家环境保护局. GB15618-1995, 土壤环境质量标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995
- [35] 刘巽浩, 牟正国, 元生朝, 等. 中国耕作制度[M]. 北京: 农业出版社, 1993: 74-87
- [36] 李世奎, 侯光良, 欧阳海, 等. 中国农业气候资源和农业气候区划[M]. 北京: 科学出版社, 1988: 37-61

责任编辑: 袁文业