

中国发展能源农业的环境效益的定量评价和地理分布格局分析

张亚平¹, 孙克勤¹, 左玉辉²

(1.东南大学能源与环境学院, 南京 210096; 2.污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京大学环境学院, 南京 210093)

摘要:在总结现有估算方法的基础上,从减少大气污染物排放、减少农村面源污染和生态效益3个方面建立环境效益的评价模型,利用已有统计资料和数据,定量评价了我国发展能源农业的潜在环境效益,并分析了其地理分布格局。研究表明:(1)中国农村生物质能蕴藏丰富,2007年我国农村生物质能源总蕴藏量和理论可利用量分别达 30.88×10^8 tce(折标煤,t)和 5.98×10^8 tce。生物质能源的利用理论可以减少排放 SO_2 1 674.33 万 t, NO_x 246.57 万 t, CO_2 15.50 亿 t, CH_4 7 524.35 万 t, 总 N 626.01 万 t, 总 P 467.96 万 t, 通过使用沼气从而减少砍伐森林 2 123.99 万 hm^2 。(2)中国发展能源农业的环境效益总体上分布不均,省际差异较大。西南、东北地区及河南、河北、山东等省是环境效益较大的地区,效益最少的地区主要分布在上海、北京、天津、青海、宁夏和海南。

关键词:能源农业;生物质能;环境效益;地理分布

中图分类号:X382 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)05-0826-07

Quantitative Appraisal of Potential Environmental Benefits from the Development of Energy Agriculture and Its Geographical Distribution in China

ZHANG Ya-ping¹, SUN Ke-qin¹, ZUO Yu-hui²

(1.School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2.State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, School of the Environment, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: Nowadays, China is facing a series of development problems like energy shortage, environmental pollution and ecological deterioration. Bioenergy industry would be a new way to address these problems. Energy agriculture, as the threshold of bioenergy use, would be flourishing in the near future. The development of energy agriculture can restore the abandoned land, reduce the emission of air pollutants and realize the contemporary carbon cycle, showing high potential environmental benefits. Through summarizing existing methods, a model for evaluating environmental benefits resulting from energy agriculture development was developed, and their distribution patterns across China were preliminarily examined based on three aspects, i.e., reduction of air pollution and rural non-point pollution and ecological effects. Reduction of air pollution was assessed by the comparison of air pollutants emission between direct combustion of biomass energy and use of coal equivalent. Reduction of rural non-point pollution was calculated by the emission reduction of N and P owing to the use of biogas from human and livestock feces. Ecological effects were evaluated by the method of restoration cost, i.e. the use of biogas avoiding chopping forest to get fuel. It was found that biomass energy resource was abundant in China with a total quantity of rural biomass energy resource of 30.88×10^8 tce (tons of coal equivalent), 5.98×10^8 tce of which could be potentially used for energy production, reducing emitting 16.74 Mt of SO_2 , 2.47 Mt of NO_x , 1.5 Gt of CO_2 , 75.24 Mt of CH_4 , 6.26 Mt of TN and 4.67 Mt of TP respectively, and chopping 21.24 Mhm^2 of forested land potentially and theoretically. Moreover, the potential economic benefits from the development of energy agriculture basically varied from province to province, showing highest values over the southeast and northeast of China as well as Henan, Hebei and Shandong Provinces, while lowest values occurring in Shanghai, Beijing, Tianjin, Ningxia and Hainan cities and provinces.

Keywords: energy agriculture; biomass energy; environmental benefits; geographical distribution

收稿日期:2009-09-08

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2007CB210208)

作者简介:张亚平(1979—),女,河南人,博士,讲师,主要从事区域能源与环境保护方面的研究。E-mail:amflora@seu.edu.cn

通讯作者:孙克勤 E-mail:skq099@163.com

所谓能源农业,就是专门为生物质能源的生产与加工提供原料的农业形态。它处于生物质能产业链的上游,是生物质能产业发展的基础。生物质能的转换和利用具有解决能源短缺和环境保护的双重效果,受到了人们的极大重视,是21世纪能源发展的一个方向^[1]。世界每年消费的生物质能约为45 EJ,仅为全球能源消费的9%~13%^[2]。据预测,到2050年,全世界利用的生物质能源将占总1次能源消耗的15%^[3-4],全球液体燃料油80%将来自木本植物、草本栽培油料和藻类等,利用农、林剩余物以及种植和利用能源作物等生物质能源,有可能提供世界60%的电力和40%的燃料^[5]。

发展能源农业具有积极的生态和环境意义。能源作物的大量种植,能够绿化荒山荒地,改造盐碱化耕地,减轻土壤侵蚀和水土流失,促进生态良性循环。因此,能源农业的有序发展,实际上是一个生态修复的过程。生物质的硫含量、氮含量低,燃烧过程中生成的 SO_x 、 NO_x 较少^[6],使用生物质能源可以大大减少污染物的排放。以能源植物为原料生产的生物质能产品,其在燃烧的过程中释放的 CO_2 正是能源植物在进行光合作用的过程中所吸收的,实现了碳元素的当代循环^[7]。利用生物技术可使畜禽粪便、秸秆类木质纤维素转化为沼气、燃料乙醇或其他产品,有利于解决农业废弃物污染,根治“畜牧公害”和“秸秆问题”。本文在总结现有估算方法的基础上,通过建立环境效益评价模型,利用已有统计资料和数据,定量评价了我国发展能源农业的潜在环境效益,并分析其地理分布格局。

1 研究方法

从使用农村生物质能资源可能替代的化石能源(主要是煤炭)的角度评价能源农业发展带来的环境效益,包括3个方面:大气污染、农村面源污染和生态效益。

1.1 大气污染

生物质能的使用可以有效降低大气污染,特别是 SO_2 、 NO_x 、 CO_2 和 CH_4 的排放。生物质能硫的含量极低^[8],而煤的含硫量大约在1%~12%之间。根据《中国能源发展报告》^[9],中国煤炭储量中,硫分小于1%的低硫煤约占总煤炭储量的65%~70%,硫分在1%~2%的约占15%~10%。

生物质能的开发使用不会造成大气中 CO_2 的净积累。生物质能的转换过程产生 CO_2 ,但是作为一个闭式循环看待,生物质能源燃烧释放的碳元素,必定

与其生长过程中完成的碳吸收相平衡, CO_2 净排放为零,与化石燃料跨地质年代的碳循环相比,生物质能实现了碳的当代循环。

秸秆和林木生物质从直接燃烧和可能取代的煤炭(折合成标准煤)燃烧排放的大气污染物的对比来评价其环境效益。人畜粪便生物质主要用来生产沼气,沼气的主要成分是 CH_4 ,其比例为50%~70%,其余为 CO 、 H_2 、 N_2 和 NH_3 。因此,沼气燃烧排放的 CO_2 、 NO_x 和 SO_2 相当小,可以忽略不计。人畜粪便生物质的环境效益的评价基于沼气燃烧排放的污染物和可能取代的煤炭燃烧过程排放的污染物的对比。能源植物主要用于生产生物燃料,即生物乙醇和生物柴油。目前,生物乙醇作为燃料主要以乙醇汽油(1:10)的形式用于机动车。生物柴油的使用包括两种形式,即纯生物柴油和生物柴油-石化柴油(2:8),我们选择纯生物柴油作对比。能源植物环境效益的评价依据为生物燃料与化石燃料(汽油和石化柴油)污染物排放的对比。

各类生物质环境效益的评价分别从直接燃烧和折合成标准煤两个方面来考虑(能源植物除外)。表1列举各类生物质的 SO_2 、 NO_x 、 CO_2 排放系数。

农村生物质能大气污染环境效益的计算公式如式(1)~(3)。

$$EEA = \sum_{i=1}^4 EE_i = \sum_{i=1}^4 (TC_i - DF_i) \quad (1)$$

$$TC_i = \sum_{i=1}^4 FRT_i \times (\text{SO}_{2i} + \text{NO}_{xi} + \text{CO}_{2i}) \quad (2)$$

$$DF_i = \sum_{i=1}^4 FR_i \times (\text{SO}_{2i} + \text{NO}_{xi} + \text{CO}_{2i}) \quad (3)$$

式中: EEA 表示总环境效益, TC_i 表示第*i*种生物质资源折标煤(能源植物分别为汽油和石化柴油)燃烧的环境污染物排放, DF_i 表示第*i*种生物质资源直接燃烧(能源植物分别为折合成乙醇汽油、纯生物柴油)的污染物排放, SO_{2i} 表示第*i*种物质的 SO_2 排放系数, NO_{xi} 表示第*i*种物质的 NO_x 排放系数, CO_{2i} 表示第*i*种物质的 CO_2 排放系数, FRT_i 表示第*i*种生物质能资源的折标能源量, FR_i 表示第*i*种生物质能资源的资源量。人畜粪便的资源量用沼气表示,能源植物的资源量用生物燃料表示,如生物柴油和1:10的乙醇汽油。

1.2 农村面源污染

近几年,我国畜禽养殖业迅速发展,每年畜禽粪便及粪水的排放量逐年增加,畜禽粪便污染问题成为当前农业面源的主要污染源之一。据报道,我国禽畜

表 1 SO₂、NO_x、CO₂、CH₄ 排放系数^[10-12]
Table 1 Emission index of SO₂、NO_x、CO₂、CH₄^[10-12]

来源	方式	SO ₂ /kg·t ⁻¹	NO _x /kg·t ⁻¹	CO ₂ /kg·t ⁻¹	CH ₄ /kg·t ^{-1a}
秸秆和农业加工剩余物	折合成标准煤	28.5	7.04	2 554.31	127.67
	直接燃烧	5.74×10 ⁻²	1.95	0	
林木生物质	折合成标准煤	28.5	7.04	2 554.31	127.67
	直接燃烧	5.74×10 ⁻²	1.95	0	
人畜粪便	折合成标准煤	28.5	7.04	2 554.31	127.67
	沼气	0	0	0	
能源植物	生产生物乙醇				
	汽油	0.41	29.22	3 070	
	乙醇汽油(10%乙醇)	-10%	15%	-25%	
生产生物柴油	石化柴油	10.8	4.80	3 188.96	
	纯生物柴油	-57.7%	+5.8%	-78.3%	

注:假设生物质能 CO₂ 的净排放为零(直接作为燃料燃烧,不考虑进一步转换为其他生物质能源),+/-表示污染物排放的增加或者减少,汽油和石化柴油污染物的排放来自机动车尾气的排放标准。a:包括燃烧和开采。

粪便仅有 50%的粪便氮素养分还田利用,15%的氮素养分挥发损失,22%的氮素养分进入水体污染环境,13%的氮素养分堆置废弃^[13]。

N、P 化肥流失是农业面源污染的又一主要来源。据调查统计,目前我国氮、磷、钾化肥当季利用率分别仅为 30%~35%、10%~20%和 35%~50%,低于发达国家 15~20 个百分点,氮素化肥的损失高达 45%^[14]。据联合国粮农组织^[15]估计,中国农田磷素进入水体的量为 19.5 kg·hm⁻²,印度为 10.9 kg·hm⁻²,美国为 2.2 kg·hm⁻²。

利用人畜粪便生产沼气,可以减少粪便中 N、P 排放到土壤和水体中,从源头控制农业面源污染。沼肥、沼液,秸秆气化后的残渣等富含 N、P,可以替代部分化肥,减少了化肥流失引起的土壤和水污染。

表 2 列举了几种禽畜粪便 N、P 含量。

通过沼气工程,可以减少人畜粪便的任意排放,减少农业面源污染。因此,农业面源污染的环境效益可以通过人畜粪便中 N、P 的含量来评价。

表 2 禽畜粪便 N、P 含量^[13-19]
Table 2 Content of N and P in manure from human and livestock^[13-19]

来源	N 含量/kg·t ⁻¹	P 含量/kg·t ⁻¹
人类	13.5	3.5
猪	2.38	5
牛	4.38	2
羊	8.98	3
马	5.20	3.5
驴骡	5.00	3
禽	10.32	11
兔	11.6	2.4

农业面源污染效益的计算公式如式(4)~(6)。

$$TE=EEN+EEP=\sum_{i=1}^n LS_i \cdot LN_i + \sum_{i=1}^n LS_i \cdot LP_i \quad (4)$$

$$EEN=\sum_{i=1}^n LS_i \cdot LN_i \quad (5)$$

$$EEP=\sum_{i=1}^n LS_i \cdot LP_i \quad (6)$$

式中:TE 表示 N、P 总量,EEN 表示总 N 量,EEP 表示总 P 量,LN_i 表示第 i 种人畜粪便中 N 的含量,LP_i 表示第 i 种人畜粪便中 P 的含量,LS_i 表示第 i 种人畜粪便的资源量。

1.3 生态效益

生态价值体现在因使用沼气置换薪柴而节约的森林资源,这部分价值可用重置成本法计算,通过计算恢复因未使用沼气而损耗的森林价值的成本得出沼气的这部分价值。通过调查,修建沼气池的农户家比未修建沼气池农户家每年节约薪柴 1.5 t,相当于封育了 0.27 hm² 山林,保护了森林植被^[16]。

生态效益 EE 的计算公式如下:

$$EE=Q_{CH}/370 \times 0.27 \quad (7)$$

式中:Q_{CH} 为沼气产量。

人畜粪便产生的沼气一部分用于农户的生活用能,更多的用于发电,结合相关文献^[20-22],我们假定 1/3 的沼气用于农村生活用能,其余 2/3 用于发电。

2 数据来源和处理

基础数据(能源植物数据除外)分别来自官方出版的《中国农业统计年鉴》、《中国统计年鉴》、《中国林业统计年鉴》和中国第五次森林资源清查数据。数据

基期为 2007 年(其中林业资源数据为第五次全国森林连续清查数据)根据文献^[23-25]中建立的中国生物质能源资源评价方法,对 2007 年我国农村生物质能源资源实物蕴藏量和理论可利用量进行了估算。计算得出,2007 年我国农村生物质能实物蕴藏总量为 30.88 亿 tce,其中理论可利用量为 5.98 亿 tce。可利用量中秸秆、粪便、林木生物质和能源植物分别占 43.81%、10.37%、44.48%和 1.34%,如表 3 所示。

表 3 中国农村生物质能源汇总

Table 3 Summarization of the main biomass resources in China

生物质类型	实物蕴藏量/ 亿 t	折标煤/ 亿 tce	理论可利用量/ 亿 tce	所占比例/ %
秸秆和农业加工 剩余物	10.53	5.23	2.62	43.81
人畜粪便	43.66	17.29	0.62 ^a	10.37
林木生物质	13.95	7.97	2.66	44.48
能源植物	2.28	0.39	0.08	1.34
合计	70.42	30.88	5.98	100

注:a 按照沼气计算;b 结合相关文献^[24-26],本文计算时认为:随着技术进步和观念变革,单就资源收集潜力来说,秸秆和畜粪资源可近似认为 100%可获得。目前,我国每年有 30%左右的秸秆被废弃或在田间直接焚烧掉,24%用于禽畜饲料,2.3%用于造纸,剩余的被用作农户的生活燃料。因此,我们认为至少 50%的秸秆可以作为生物质能的原材料。人畜粪便资源 1/3 用于能源,我国林木资源中约 1/3 用作能源。

基于对我国农村生物质能源资源理论可利用量的估算结果,利用上述方法和公式首先计算各省发展能源农业的环境效益,然后用 ArcGIS 软件对其地理分布格局进行分析,地理分布以省(直辖市、自治区)为单元。

3 结果和分析

根据上述计算方法和数据,计算得到中国能源农业发展的潜在环境效益,如表 4。2007 年,我国利用农村生物质能源可以减少排放 SO₂1 674.33 万 t,NO_x 246.57 万 t,CO₂15.50 亿 t,CH₄7 524.35 万 t,减少排放总 N626.01 万 t,总 P467.96 万 t,通过使用沼气减少砍伐森林 2 123.99 万 hm²。

环境效益的地理分布格局与生物质能源资源的地理分布格局基本是一致的(见表 5、图 1~图 7)。由于我国农村生物质能源资源总体上分布不均,省际差异较大,环境效益的省际差异也非常大。从总体上看,西南、东北地区以及河南、河北、山东等省是我国生物质能的主要分布区,也是发展能源农业的环境效益最大的地区。

表 4 中国能源农业发展潜在的环境效益

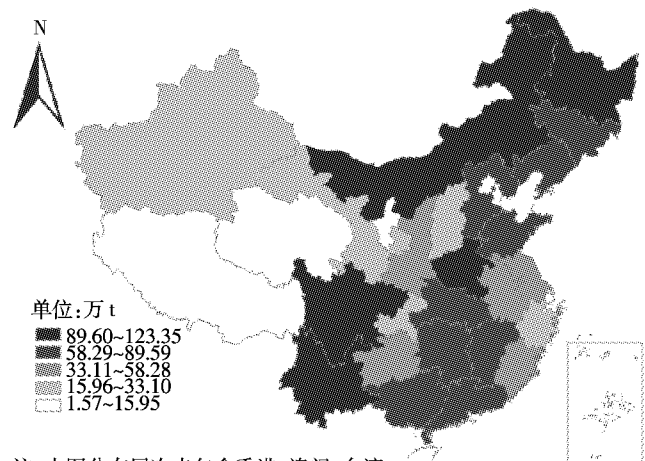
Table 4 Potential environmental benefits from the development of energy agriculture

评价指标	全国总量
SO ₂	1 674.33 万 t
NO _x	246.57 万 t
CO ₂	154 961.06 万 t
CH ₄	7 524.35 万 t
总 N	626.01 万 t
总 P	467.96 万 t
森林面积	2 123.99 万 hm ²

表 5 中国发展能源农业的环境效益的省区分布差异

Table 5 Potential environmental benefits from the development of energy agriculture in different provinces of China

效益来源	排序	范围/万 t·万 hm ⁻²	包括省(市、区)
SO ₂	前五位	>101	黑龙江、内蒙古、河南、四川、云南
NO _x	前五位	>15.25	河南、四川、黑龙江、广西、内蒙古
	后五位	<1.55	上海、北京、天津、青海、海南
CH ₄	后五位	<1.15	上海、北京、天津、青海、宁夏
CO ₂	前五位	>9 200	黑龙江、内蒙古、河南、四川、云南
	后五位	<768	上海、北京、天津、青海、宁夏
CH ₄	前五位	>454	黑龙江、内蒙古、河南、四川、云南
	后五位	<38	上海、北京、天津、青海、海南
总 N	前五位	>45	河南、山东、河北、四川、内蒙古
	后五位	<5.12	上海、天津、北京、海南、浙江
总 P	前五位	>28	河南、四川、山东、河北、湖南
	后五位	<3.38	上海、北京、天津、宁夏、海南
森林面积	前五位	>120	河南、四川、河北、山东、内蒙古
	后五位	<15.39	上海、北京、天津、宁夏、海南



注:本图分布层次未包含香港、澳门、台湾

图 1 我国 SO₂ 减排量的地理分布Figure 1 Distribution of SO₂ emission reduced

SO₂、CO₂ 和 CH₄ 的评价结果均显示,黑龙江、内蒙古、河南、四川和云南五省区减排量最大,共占全国

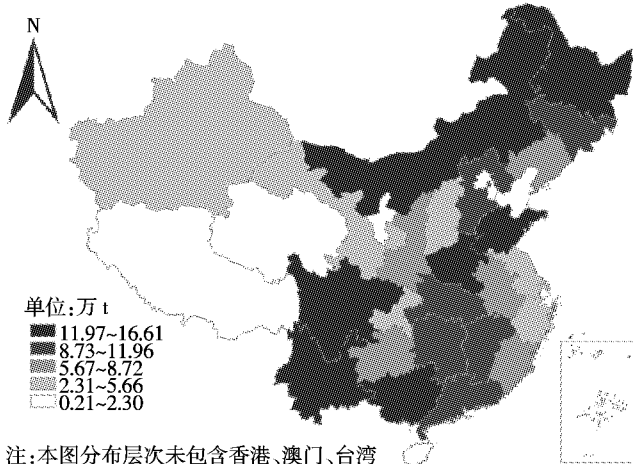


图2 我国 NO_x 减排量的地理分布

Figure 2 Distribution of NO_x emission reduced

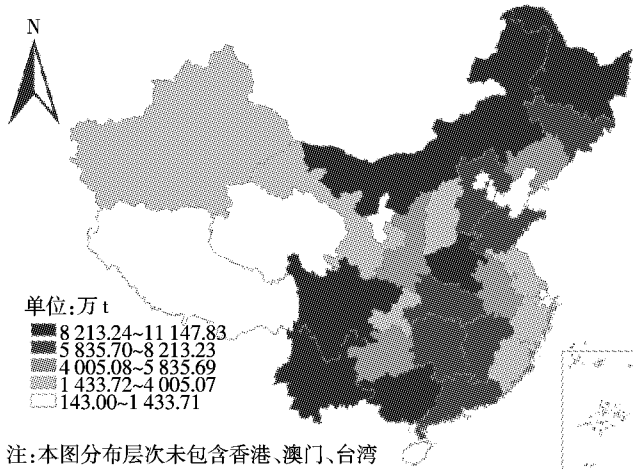


图3 我国 CO₂ 减排量的地理分布

Figure 3 Distribution of CO₂ emission reduced

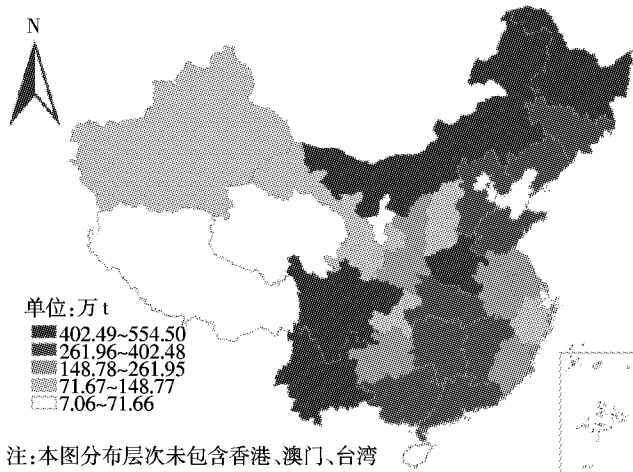


图4 我国 CH₄ 减排量的地理分布

Figure 4 Distribution of CH₄ emission reduced

总量的近 1/3。河南、四川、黑龙江、广西、内蒙古五省区 NO_x 减排量最大,共占全国总量的近 1/3。直辖市上海、北京、天津,面积较小的宁夏、地广人稀的青海和最南端的海南省是环境效益最小的地区,合计仅仅占全国总量的 1%左右。

农村面源污染效益的地理分布与禽畜饲养分布一致(见图 5 和图 6)。总 N 和总 P 减排效益最显著的地区主要分布在河北、内蒙古、山东、河南、四川和湖南等养殖业和畜牧业较为发达的省份,其中河北、内蒙古、山东、河南和四川五省区总 N 减排量位居全国前五,共计占全国总量的 40%以上;总 P 减排效益最大的五省依次是河南、四川、山东、河北和湖南,五省合计占全国总量的 39.24%。

生态效益的地理分布同样与禽畜饲养相关。从图 7 可以看出,生态效益较大的省份都集中在我国禽

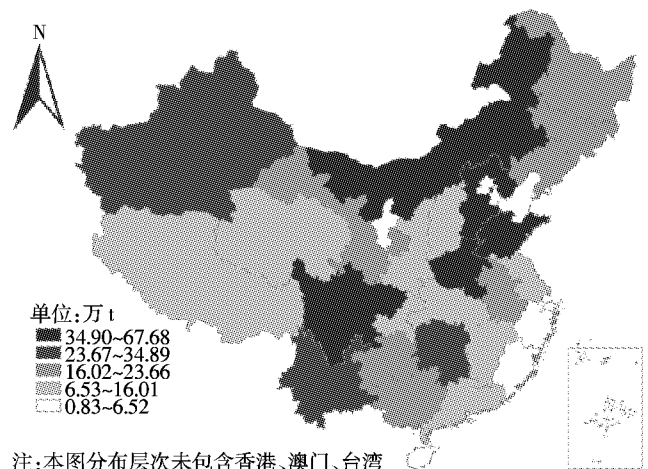


图5 我国总 N 减排量的地理分布

Figure 5 Distribution of TN emission reduced

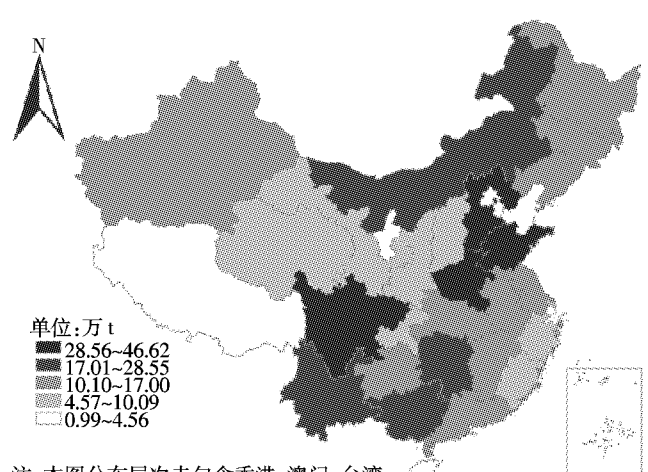


图6 我国总 P 减排量的地理分布

Figure 6 Distribution of TP emission reduced

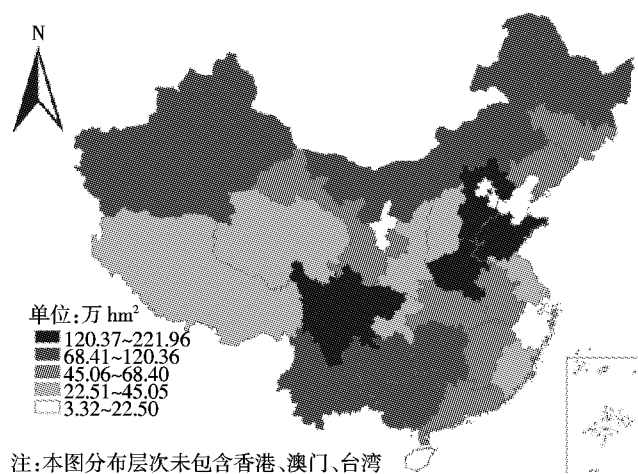


图7 我国减砍森林面积的地理分布

Figure 7 Distribution of deforestation area reduced

畜牧养大省,如河北、内蒙古、山东、河南和四川五省,共占全国总量的38.72%。

4 结论和讨论

(1)中国农村生物质能蕴藏丰富,2007年我国农村生物质能源总蕴藏量和理论可获得量分别达 30.88×10^8 tce 和 5.98×10^8 tce,这为我国发展能源农业奠定了充足的资源基础。发展能源农业可以取得显著的环境效益。2007年,我国利用农村生物质能源理论上可以减少排放 SO_2 1674.33 万 t, NO_x 246.57 万 t, CO_2 15.50 亿 t, CH_4 7524.35 万 t,减少排放 626.01 万 t 总 N, 467.96 万 t 总 P,减少砍伐森林 2123.99 万 hm^2 。

(2)能源农业发展的潜在环境效益总体上分布不均,省际差异较大。西南、东北地区以及河南、河北、山东等省是我国发展能源农业环境效益最大的地区,效益最少的地区主要分布在上海、北京、天津、青海、宁夏和海南。

(3)我国能源农业发展较慢,目前主要集中在沼气的利用和秸秆气化等方面。生物质发电技术、生物质固体成型燃料技术、秸秆生物气化技术、生物燃料乙醇和生物柴油技术仍处于试点示范阶段或正进入商业化早期发展阶段。因此,发展能源农业的环境效益尚未显现。随着世界范围能源危机的加剧,作为生物质能源前端的能源农业势必得以大力发展,能源农业所带来的效益也将得到极大的彰显。然而,由于发展能源农业需要占用大量的土地,必须处理好能源安全与粮食安全的关系,妥善解决能源作物与农产品争地的问题。可以通过适当利用宜耕土地后备资源、开

发和利用宜林荒山荒坡等未利用土地以及改造一部分盐碱化耕地的方式大力发展能源农业,充分挖掘能源农业的环境效益。

参考文献:

- [1] 张英珊. 生物质能-能源的新出路[J]. 西部资源, 2006(2): 20-21.
ZHANG Ying-shan. Bioenergy-the new way of energy[J]. *Western Resources*, 2006(2): 20-21.
- [2] Turkenburg W C. Renewable energy technologies, in world energy assessment[M]//Goldenberg J, editor. Washington DC: UNDP, 2000.
- [3] Fischer G, Froberg K, Parry ML, Rosenzweig C[M]//Downing the, editor. Climate change and world food security. NATO ASI Series, vol. I. Berlin: Springer, 1996.
- [4] NakiDcenoviDc N, Grubler A, McDonald A. Global energy perspectives [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1998.
- [5] Klass D L. Biomass for renewable energy, fuels, and chemicals[M]. Academic Press, San Diego, USA 1998.
- [6] Gaunt J L, Lehmann J. Energy balance and emissions associated with biochar sequestration and pyrolysis bioenergy production[J]. *Environmental Science and Technology*, 2008, 42(11): 4152-4158.
- [7] Claassen, PAM, van Lier, JB, Contreras, AML, et al. Utilization of biomass for the supply of energy carriers[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 1999, 52(6): 741-755.
- [8] 朱 达. 能源-环境的经济分析与政策研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2000.
ZHU Da. Economic analysis and policy research of Energy-environment [M]. Beijing: China Environment Press, 2000.
- [9] 魏一鸣, 范 英, 韩智勇, 等. 中国能源发展报告(2006)-战略与政策研究[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
WEI Yi-ming, FAN Ying, HAN Zhi-yong, et al. Report on energy development of China(2006)-Strategy and policy research[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [10] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)(1996a) Revised IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories; Workbook (Volume 2) and Reference Manual (Volume 3). United Nations Environment Program, organization of Economic Cooperation and Development, International Energy Agency, and Intergovernmental Panel on Climate Change [EB/OL]. (1996-01-20)[2008-06-14]. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs1.htm>.
- [11] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate change 1995: The science of climate change[M]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1996.
- [12] 胡志远, 谭丕强, 楼狄明, 等. 不同原料制备生物柴油生命周期能耗和排放评价[J]. 农业工程学报, 2006, 22(11): 141-146.
HU Zhi-yuan, TAN Pi-qiang, LOU Di-ming, et al. Assessment of life cycle energy consumption and emissions for several kinds of feedstock based biodiesel[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(11): 141-146.
- [13] 刘晓利, 许俊香, 王 方, 等. 我国畜禽粪便中氮素养分资源及其分布状况[J]. 河北农业大学学报, 2005, 28(5): 27-32.

- LIU Xiao-li, XU Jun-xiang, WANG Fang, et al. The resource and distribution of nitrogen nutrient in animal excretion in China[J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2005, 28(5):27-32.
- [14] 王海燕, 杜一新, 梁碧元. 我国化肥使用现状与减轻农业面源污染的对策[J]. *现代农业科技*, 2007, (20):135-136.
- WANG Hai-yan, DU Yi-xin, LIANG Bi-yuan. The current condition of fertilizer use and strategy of reducing the agricultural pollution[J]. *Modern Agricultural Technology*, 2007(20):135-136.
- [15] FAO. Prevention of water pollution by agriculture and related activation[J]. *Water REP*, 1993(1):223-245.
- [16] 田穆发. 户用常温沼气池技术经济效益分析[J]. *湖南农业科学*, 2006(3):112-115.
- TIAN Mu-fa. Technological and economical analysis of household biogas[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2006(3):112-115.
- [17] 彭里, 王定勇. 重庆市畜禽粪便年排放量的估算研究[J]. *农业工程学报*, 2004, 20(1):288-293.
- PENG Li, WANG Ding-yong. Estimation of annual quantity of total excretion from livestock and poultry in Chongqing Municipality[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2004, 20(1):288-293.
- [18] 李帷, 李艳霞, 张丰松, 等. 东北三省畜禽养殖时空分布特征及粪便养分环境影响研究[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(6):2350-2357.
- LI Wei, LI Yan-xia, ZHANG Feng-song, et al. The spatial and temporal distribution features of animal production in three northeast Provinces and the impacts of manure nutrients on the local environment[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(6):2350-2357.
- [19] 全国农业技术推广服务中心编著. 中国有机肥料养分志[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999.
- NATESC. Organic fertilizer nutrients in China[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1999.
- [20] A Milbrandt. A geographic perspective on the current biomass resource availability in the United States[R]. National Renewable Energy Laboratory, 2005.
- [21] 曾麟, 王革华. 我国生物质能发展前景广阔[J]. *中国科技成果*, 2005:13.
- ZENG Lin, WANG Ge-hua. Biomass energy has great future in China[J]. *Chinese Science Production*, 2005:13.
- [22] 中国农村能源行业协会. 中国生物能开发利用与战略思考[R]. 北京, 2000.
- China Association of Rural Energy Industry. Exploitation, utilization and strategic considerations of biomass energy in China[R]. Beijing, 2000.
- [23] 刘刚, 沈镭. 中国生物质能源的定量评价及其地理分布[J]. *自然资源学报*, 2007, 22(1):9-19.
- LIU Gang, SHEN Lei. Quantitative appraisal of biomass energy and its geographical distribution in China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2007, 22(1):9-19.
- [24] 张亚平, 左玉辉, 柏益尧. 江苏省能源农业发展的资源现状与发展潜力[J]. *生态学报*, 2008, 28(8):3948-3957.
- ZHANG Ya-ping, ZUO Yu-hui, BAI Yi-yao. Resource status and potential development of energy agriculture in Jiangsu Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(8):3948-3957.
- [25] Yaping Zhang, Yuhui Zuo, Yiyao Bai. Potential Use and development strategy of bioenergy in Southeast China—the Case of Jiangsu Province[J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2008, 17(8a):1088-1095.
- [26] 中国林木生物质能源研究专题组. 中国林木生物质能源资源培育和发展潜力调查[J]. *中国林业产业*, 2006(1):12-21.
- China Forest Bioenergy Research Team. Resource and development potentials of forest bioenergy in China[J]. *China Forest Industry*, 2006(1):12-21.