

区域农田有机物质投入量的估算方法^①

——以陕西长武县为例

周 睿^{1,2}, 潘贤章^{1*}, 王昌坤^{1,2}, 刘 娅^{1,2}, 李燕丽^{1,2}, 石荣杰^{1,2}, 解宪丽¹

(1 中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室(南京土壤研究所), 南京 210008; 2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要:以黄土高原典型沟壑区长武县为研究区域, 进行区域农田有机物质投入量估算方法的研究。将农田有机物质投入分为秸秆还田、秸秆根茬残留、作物地下生物量和有机肥 4 个部分分别进行估算。基于 LANDSAT 5 卫星遥感资料, 利用 CASA 模型估算植物第一净生产力, 获得作物整株重, 结合作物根冠比估算作物地上生物量和地下生物量, 以地上生物量和实地秸秆调查来估算秸秆根茬量和秸秆还田量。估算结果显示, 长武县农田年总有机物质投入量为 42 700 t。

关键词:有机物质投入量; CASA; 长武县

中图分类号:S153

大气 CO₂ 浓度升高引起的全球气候变化是人们关注的重要环境问题^[1]。国内外学者研究表明, 土壤固碳具有很大的潜力, 通过土壤有机碳固定势必成为 CO₂ 减排压力下碳汇的重要途径^[2-4]。农业土壤碳库受人为活动干扰强烈, 通过农业管理措施可以改变农田土壤碳库状况^[5]。有机物质投入是影响农田土壤固碳的决定性因素之一, 了解有机物质投入的时空分布规律是定量化研究区域土壤固碳速率和潜力的重要基础。合理的有机物投入可以建立良性农田微生物循环机制, 提高土壤肥力, 改善土壤结构。

有机物质来源主要是作物秸秆和根茬、作物根系、有机肥料等。其中, 作物秸秆还田对于土壤固碳作用潜力很大。我国 2010 年粮食总产量 5.464 亿 t, 按草谷比 1.2 计算, 加上其他秸秆, 秸秆总量超过 7 亿 t。据研究, 加入土壤的玉米秸秆, 有 11% 可以转化为土壤有机质; 施入 2 倍玉米秸秆到土壤中, 11 年可以增加土壤有机质约 3.1 g/kg^[6]。可见, 秸秆还田是一项重要的土壤固碳措施。此外, 作物根系也是土壤有机物质主要来源之一。据研究, 谷类作物地下生物量可从 50 g/m² 到超过 500 g/m²^[6], 表征地下生物量重要指标的根冠比可从 1.6 到 11.0^[7]。而有机肥料投入虽然是土壤有机物质投入的重要来源之一, 但

是在近年投入量有下降的趋势, 且主要施入果园, 农田投入很少。

目前我国农业正经历着传统农业向现代农业的转变, 2012 年全国机耕面积达到 4 300 万 hm², 免耕达到 2 000 万 hm²。随着机械化秸秆还田技术的推广与应用, 秸秆还田有增加的趋势^[9]。但是, 目前仍然缺乏秸秆还田量的估算方法, 在农田有机物质投入估算时也经常没有考虑地下生物量, 造成总量估算比实际投入量偏低。本文提出利用遥感方法估算整株生物量, 再分别估算地上和地下生物量, 结合实地根茬高度调查, 进行农田有机物质投入量估算, 从区域上探讨农田有机物质投入量, 对农田土壤固碳的进一步研究具有重要的意义。

1 研究区概况

长武县位于陕西省西北黄土高原丘陵沟壑区, 地理位置 34°59'09"~35°18'37"N, 107°38'49"~107°58'02"E。地形地貌复杂, 沟坡塬滩兼有。全县总土地面积 56 885 hm², 其中耕地面积为 15 020 hm², 占全县总面积的 26%。作物主要是小麦。土壤类型包括 5 个土类, 8 个亚类, 14 个土属、41 个土种, 主要土类是黑垆土和黄绵土。该区属于暖温带半湿润大陆性

基金项目: 中国科学院战略先导性项目(XDA05050509)和自然科学基金项目(41071140, U1033004)资助。

* 通讯作者(panxz@issas.ac.cn)

作者简介: 周睿(1978—), 男, 江苏连云港人, 博士研究生, 主要从事土壤遥感和地理信息系统应用研究。E-mail: rzhou@njbas.ac.cn

季风气候区，四季冷暖干湿分明，年均气温 9.1℃，年均无霜期 171 天，年均降水量 584.1 mm，降水多集中在 7、8、9 月，占全年降水量的 54.9%。降雨分布模式为南塬多于北塬，塬面多于河滩。长期以来，水土流失导致土壤贫瘠，化肥投入量不足，小麦产量低而不稳。

2 研究方法

2.1 小麦秸秆调查

2011 年 6 月底在小麦收割后对长武的秸秆还田状况和根茬高度进行了实地野外调查。秸秆调查沿主要公路开展，按间隔 3~5 km 选取一个代表性田块，在田间随机测量 20 根秸秆根茬的高度，并取平均值作为该田块根茬高度，同时拍照记录。然后向田块主人调查作物轮作制度、作物产量、肥料使用情况、灌溉、秸秆还田方式及数量、秸秆焚烧等情况。共获得了 67 个代表性田块的调查数据，调查田块的空间分布如图 1 所示。

2.2 农田有机物质投入量的估算方法

农田有机物质投入主要包括 4 部分：秸秆还田、作物根茬残留、作物地下生物量和有机肥。根据调查，

长武当地的猪粪、鸡粪 90% 以上都用于沼气池和果园，小麦施用有机肥极少，可以忽略。因此，估算长武农田有机物质投入总量主要考虑秸秆还田、作物根茬残留和地下生物量 3 个部分。估算方法如图 2 所示。

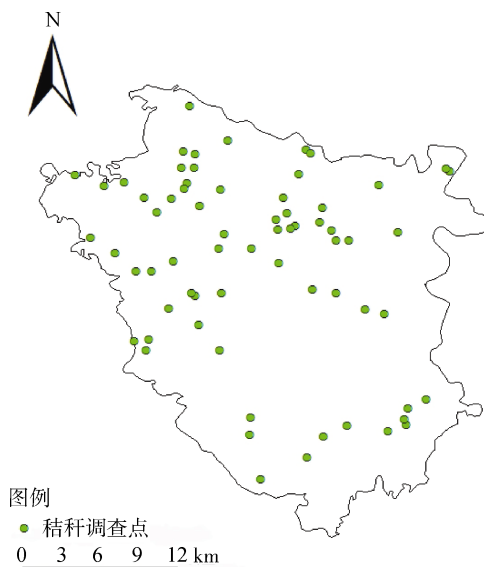


图 1 长武县秸秆调查田块的分布
Fig. 1 Distribution of field survey in Changwu County

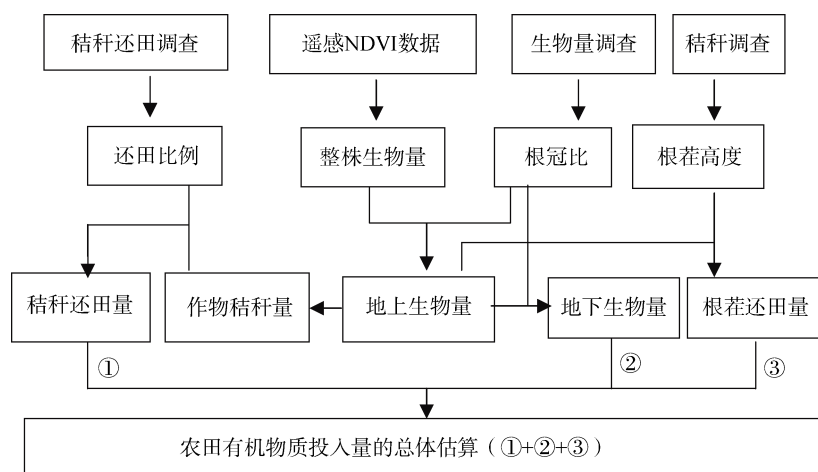


图 2 农田有机物质投入量估算方法

Fig. 2 Method for estimating the input of organic matter in the farmland

首先，整株生物量由植被净初级生产力(NPP)来估算：

$$B_{\text{total}} = \alpha \times \text{NPP} \quad (1)$$

式中， B_{total} 为作物整株生物量(包括地上和地下)，单位是 g/m^2 (以单质 C 计)，NPP 为植物净初级生产力，单位为 g/m^2 (以单质 C 计)， α 为碳-干物质系数，一般 $\alpha = 2.22$ 。则地上生物量为：

$$B_{\text{top}} = B_{\text{total}} / (1 + \gamma) \quad (2)$$

$$B_{\text{root}} = B_{\text{total}} \times \gamma / (1 + \gamma) \quad (3)$$

式中， γ 为根冠比。根据实地采样分析，长武县小麦根冠比为 0.34。

通过地上生物量以及收获指数^[9]进行秸秆总量的估算，然后利用实地调查所获得的秸秆还田比例和作物根茬高度计算秸秆还田量和作物根茬量。

作物秸秆量估算：

$$B_{\text{straw}} = (1 - \text{HI}) \times B_{\text{total}} / (1 + \gamma) \quad (4)$$

式中, HI 为作物收获指数, B_{straw} 为秸秆生物量, B_{yield} 为籽实产量。

还田秸秆量估算:

$$B_{\text{return}} = B_{\text{straw}} \times \beta \quad (5)$$

式中, B_{return} 为秸秆还田量, β 为秸秆还田比例。

根茬还田量计算仅针对不焚烧情况, 燃烧情况下根茬量为 0。

$$B_{\text{residue}} = B_{\text{straw}} \times H_{\text{residue}} / H_{\text{straw}} \quad (6)$$

式中, B_{residue} 为根茬量, H_{residue} 为根茬高度, H_{straw} 为作物平均高度。

因此, 有机物质投入总量为:

$$OM_{\text{total}} = B_{\text{root}} + B_{\text{return}} + B_{\text{residue}} \quad (7)$$

区域农田有机物质投入量的估算则在田块级估算的基础上结合空间插值法完成。根据各调查点的地理位置, 结合秸秆根茬量, 利用进行空间插值获得根茬量的区域空间分布。然后利用公式(1)~(7)估算区域有机物质投入的空间分布, 再进行统计分析。

2.3 NPP 模型选取

本文有机物质投入估算方法中整株生物量的估算是关键过程。目前常用来进行陆地植被净初级生产力估算的模型可以分为 3 类: 气候相关模型、生态生理过程模型、光利用率模型^[10]。生态生理过程模型以 TEM 模型、CENTURY 模型为代表, 主要基于植物生长发育过程的生理过程或生态系统内部功能过程, 在系统尺度上模拟冠层的光合作用、蒸腾作用、碳氮变化等。这类模型所需参数太多且难以获取, 大范围推广比较困难^[11-14]。本文选取了 CASA(Carnegie-Ames-Stanford Approach)模型, 植被净第一生产力(NPP)主要由植被所吸收的光合有效辐射(APAR)与光能转化率(ϵ)两个变量来确定^[15-17]。

$$NPP(x, t) = APAR(x, t) \times \epsilon(x, t) \quad (8)$$

式中, $APAR(x, t)$ 表示像元 x 在 t 月吸收的光合有效辐射($\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{month})$), $\epsilon(x, t)$ 表示像元 x 在 t 月的实际光能利用率($\text{C}, \text{g}/\text{MJ}$)。

植物吸收的光合有效辐射(APAR)取决于太阳总辐射和植物本身的特征, 可用公式(9)计算。

$$APAR(x, t) = SOL(x, t) \times FPAR(x, t) \times 0.5 \quad (9)$$

式中, $SOL(x, t)$ 表示 t 月在像元 x 处的太阳总辐射量($\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{month})$), $FPAR(x, t)$ 为植被层对入射光合有效辐射的吸收比例, 常数 0.5 表示植被所能利用的太阳有效辐射占太阳总辐射的比例。

在一定范围内, FPAR 与 NDVI(归一化植被指数)

之间存在线性关系, 这一关系可以根据某一植物类型 NDVI 的最大值和最小值以及所对应的 FPAR 最大值和最小值来确定, 即

$$FPAR(x, t)_{\text{NDVI}} = \frac{(NDVI(x, t) - NDVI_{i, \min})}{(NDVI_{i, \max} - NDVI_{i, \min})} \times (FPAR_{\max} - FPAR_{\min}) + FPAR_{\min} \quad (10)$$

FPAR 与 NDVI 的关系还可由下式表示:

$$FPAR(x, t)_{\text{SR}} = \frac{(SR(x, t) - SR_{i, \min})}{(SR_{i, \max} - SR_{i, \min})} \times (FPAR_{\max} - FPAR_{\min}) + FPAR_{\min} \quad (11)$$

$$SR(x, t) = \frac{1 + NDVI(x, t)}{1 - NDVI(x, t)} \quad (12)$$

由于 $FPAR_{\text{NDVI}}$ 计算出来的值比实测值偏高, 而 $FPAR_{\text{SR}}$ 计算出来的值比实测值偏低, 因此, 一般取二者平均数作为最终估测的值。

$$FPAR = 0.5 \times FPAR_{\text{NDVI}} + 0.5 \times FPAR_{\text{SR}} \quad (13)$$

光能转化率(ϵ)是指植被把所吸收的光合有效辐射(APAR)转化为有机碳的效率。Potter 等^[18]认为在理想条件下植被具有最大光能转化率, 而在现实条件下光能转化率主要受温度和水分的影响。

$$\epsilon(x, t) = T_{e1}(x, t) \times T_{e2}(x, t) \times W_e(x, t) \times \epsilon_{\max} \quad (14)$$

式中, $T_{e1}(x, t)$ 和 $T_{e2}(x, t)$ 表示低温和高温对光能转化率的影响, $W_e(x, t)$ 为水分胁迫因子, $\epsilon_{\max}$ 是理想条件下的最大光能利用效率。

2.4 基础数据及处理

本研究所利用的遥感数据来自中国科学院国际科学数据服务平台(下载网址: <http://datamirror.csdb.cn/index.jsp>)。首先, 将 1:5 万长武县地形图扫描为栅格图, 在 ArcGIS 系统中以栅格地形图的公里网对地形图进行空间定位。投影参考系采用与地形图一致的北京 1954 平面坐标系, 在此基础上对遥感图像进行空间定位和重采样。在 TM 4、3、2 假彩色合成图像上参照地形图选取近 20~30 个地面控制点, 进行遥感图像的几何校正。农田分布图主要采用计算机辅助目视解译法获得。

考虑到小麦收割前叶片发黄导致的 NDVI 值下降, 选取了稍早的 5 月份 LANDSAT5 图像进行处理。在 ENVI 软件中对包含研究区域的遥感图像进行重采样, 然后和县域图叠加将研究区域截取出来。转化为辐射值图像后利用 FLAASH 功能进行大气校正, 通过比率计算获得 NDVI 图像。将 NDVI 图像、农田分布图和秸秆调查插值图相叠加, 利用公式(1)~(14)生成秸秆根茬分布图和地下生物量分布图。

3 结果和讨论

3.1 秸秆还田量

根据野外调查,长武县经济比较落后,秸秆大多收集起来用于贩卖,还有小部分拖回家焚烧,田里只留下移走时残留的麦茬,量非常少,因此将秸秆还田比率 β 按 5% 估算。将 β 值代入公式(5)计算,并与 NDVI 图像和农田分布图相叠加,获得长武县农田秸秆还田量分布图(图 3)。结果表明长武县秸秆还田的单位面积重量主要集中在 100 ~ 150 kg/hm²(表 1),平均单位面积重量为 178.4 kg/hm²。

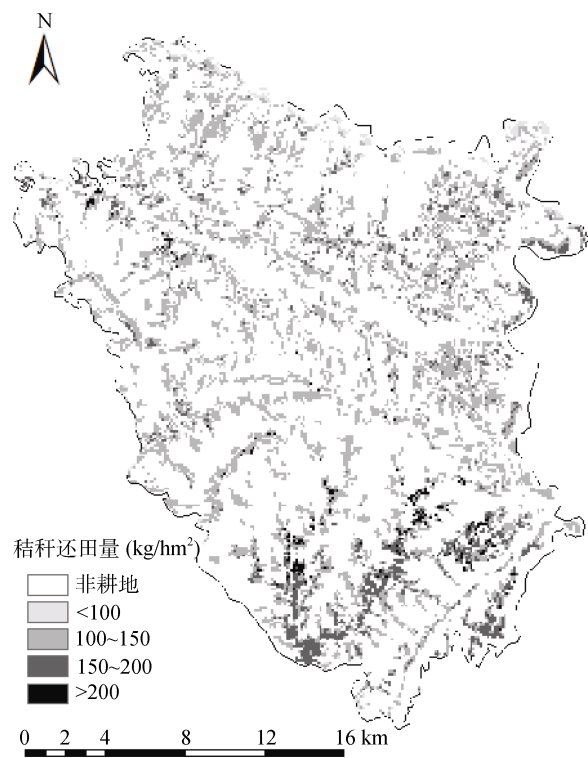


图 3 长武县秸秆还田量分布图
Fig. 3 Spatial distribution of straw returned in Changwu County

表 1 秸秆还田量分布比例
Table 1 Distribution proportion of straw returned

秸秆还田量(kg/hm ²)	比例(%)
<100	8.7
100 ~ 150	45.8
150 ~ 200	29.6
>200	15.9

3.2 秸秆根茬量

根据野外调查,除了极少数农业机械难以到达的梯田,长武县大多数小麦收割时统一采用机械收割,留茬较高。对秸秆根茬实测值进行克里

格插值,再将插值图与 NDVI 图像和农田分布图相叠加生成长武县农田秸秆根茬分布图(图 4)。结果表明长武县秸秆根茬的单位面积重量主要集中在 400 ~ 800 kg/hm²(表 2),平均单位面积重量为 770.7 kg/hm²。

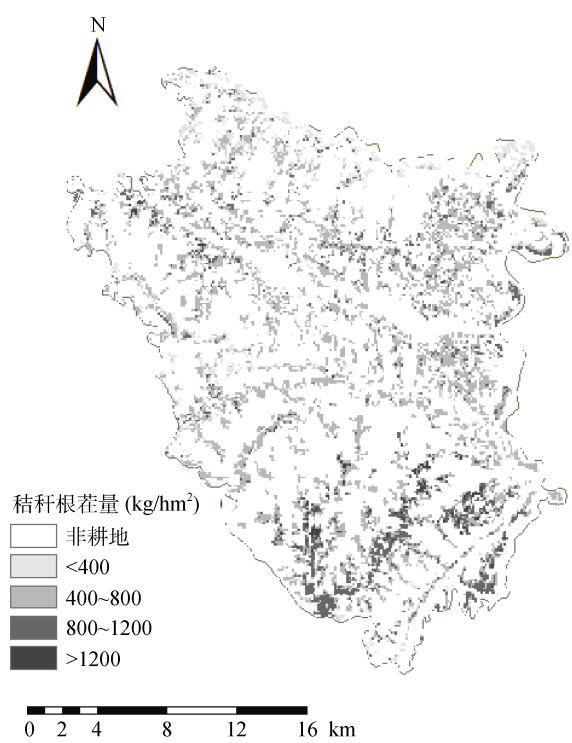


图 4 长武县秸秆根茬量分布图
Fig. 4 Spatial distribution of straw residues in Changwu County

表 2 秸秆根茬量分布比例
Table 2 Distribution proportion of straw residues

秸秆还田量(kg/hm ²)	比例(%)
<400	14.9
400 ~ 800	63.2
800 ~ 1 200	17.4
>1 200	4.5

3.3 地下生物量

结合前述结果与长武县根冠比实测值,获得长武县农田地下生物量的分布图(图 5)。结果表明,长武县秸秆的地下生物量的单位面积重量主要集中在 1 200 ~ 1 800 kg/hm²(表 3),平均单位面积重量为 1 925.3 kg/hm²。

3.4 总有机物质投入量

长武县农田有机物质投入来源如图 6 所示。秸秆还田量为 2 650 t,秸秆根茬量为 11 450 t,地下生物量 28 600 t,有机肥投入 0 t,总农田有机物质投入量为 42 700 t。

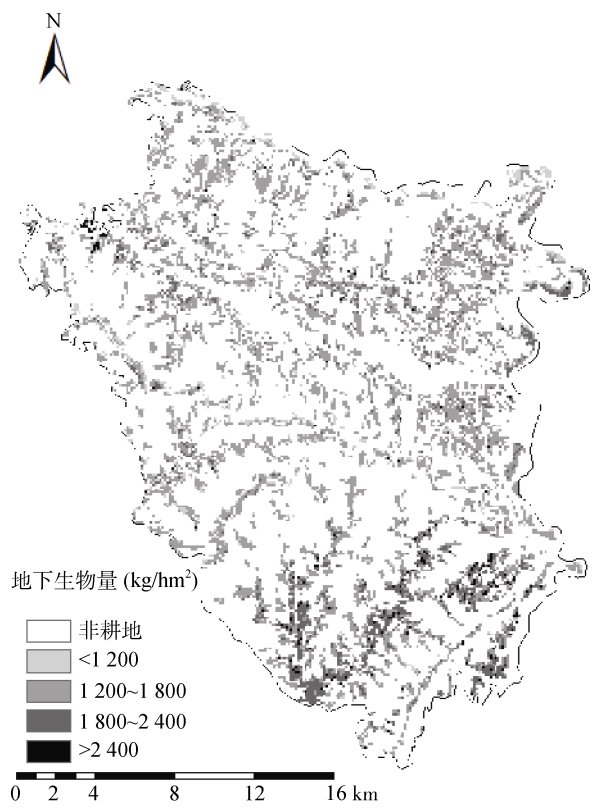


图 5 长武县地下生物量分布图
Fig. 5 Spatial distribution of underground biomass in Changwu County

表 3 地下生物量分布比例
Table 3 Distribution proportion of underground biomass

地下生物量(kg/hm ²)	比例(%)
<1 200	11.7
1 200 ~ 1 800	67.2
1 800 ~ 2 400	16.9
>2 400	4.2

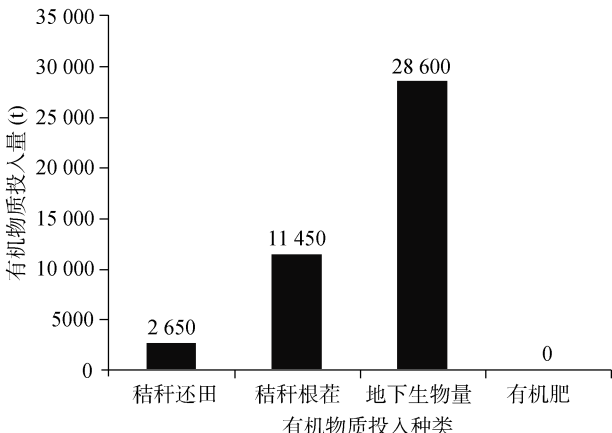


图 6 长武县农田有机物质投入量
Fig. 6 Input of organic matter in the farmland in Changwu County

4 结论

本文利用改进的 CASA 模型，结合遥感资料和

气象资料，将农田有机物质投入细分为 4 个主要来源：秸秆还田、作物根茬残留、作物地下生物量和有机肥，并分别进行了探讨和计算。结果表明：长武县农田单位面积有机物质投入量为：秸秆还田 178.4 kg/hm²，秸秆根茬 770.7 kg/hm²，地下生物量 1 925.3 kg/hm²，总量 2 874.4 kg/hm²。

致谢：感谢中国科学院计算机网络信息中心提供 Landsat TM 影像。

参考文献：

[1] Norby RJ, Luo Y. Evaluating ecosystem responses to rising atmospheric CO₂ and global warming in a multi-factor world[J]. Nature, 2003, 421: 57-60

[2] 张勇, 史学正, 赵永存, 于东升, 王洪杰, 孙维侠. 滇黔桂地区土壤有机碳储量与影响因素研究[J]. 环境科学, 2008, 29(8): 2 314-2 319

[3] Zhu WQ, Pan YZ, He H, Yu DY, Hu HB. Simulation of maximum light use efficiency of some typical vegetation types in China[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51: 457-463

[4] Terry RL, Jeff PT, Kimberly HR, Stephen SH, Cynthia R, Alan PJ. Fingerprints of global warming on wild animals and plants[J]. Nature, 2003, 421(6 918): 57-60

[5] Halpern MT. Tillage and Residue Management Effect on Soil Organic Matter Dynamics in a Sandy-loam[D]. Montreal: McGill University, 2009

[6] Barber SA. Corn residue management and soil organic matter[J]. Agronomy Journal, 1979, 71: 625-627

[7] Bolinder MA, Janzen HH, Gregorich EG, Angers DA, VandenBygaart AJ. An approach for estimating net primary productivity and annual carbon inputs to soil for common agricultural crops in Canada[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2007: 29-42

[8] 梁二, 蔡典雄, 代快, 张丁辰, 冯宗会, 刘爽, 王燕, 王小彬. 中国农田土壤有机碳变化: 土壤固碳潜力估算[J]. 中国土壤与肥料, 2010(6): 87-93

[9] 毕于运, 高春雨, 王亚静, 李宝玉. 中国秸秆资源数量估算[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 211-217

[10] 朱文泉, 陈云浩, 徐丹, 李京. 陆地植被净初级生产力计算模型研究进展[J]. 生态学杂志, 2005, 24(3): 296-300

[11] 朱文泉, 潘耀忠, 张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算[J]. 植物生态学报, 2007, 31(3): 413-424

[12] 罗艳, 王春林. 基于 MODIS NDVI 的广东省陆地生态系统净初级生产力估算[J]. 生态环境学报, 2009, 18(4): 1 467-1 471

[13] 陈卓奇, 邵全琴, 刘纪远, 王军邦. 基于 MODIS 的青藏高原植被净初级生产力研究[J]. 地球科学, 2012, 42(3): 402-410

[14] 何勇, 董文杰, 季劲均, 丹利. 基于 AVIM 的中国陆地生态系统净初级生产力模拟[J]. 地球科学进展, 2005, 20(3): 345-349

- [15] 姜立鹏, 覃志豪, 谢雯, 徐斌. 基于 MODIS 数据的草地净初级生产力模型探讨[J]. 中国草地学报, 2006, 28(6): 72–76
- [16] 朱文泉, 潘耀忠, 龙中华, 陈云浩, 李京, 扈海波. 基于 GIS 和 RS 的区域陆地植被 NPP 估算——以中国内蒙古为例[J]. 遥感学报, 2005, 9(3): 300–307
- [17] 李刚, 辛晓平, 王道龙, 石瑞香. 改进 CASA 模型在内蒙古草地生产力估算中的应用[J]. 生态学杂志, 2007, 26(12): 2 100–2 106
- [18] Potter CS, Randerson JT, Field CB, Matson PA, Vitousek PM, Mooney HA, Klooster SA. Terrestrial ecosystem production: a process model based on global satellite data and surface data[J]. Global Biogeochemical Cycles, 1993, 7: 811–841

Estimation Method for Inputs of Organic Matter to Regional Farmland ——Taking Changwu County as A Case Study

ZHOU Rui^{1, 2}, PAN Xian-zhang^{1*}, WANG Chang-kun^{1, 2}, LIU Ya^{1, 2}, LI Yan-li^{1, 2},
SHI Rong-jie^{1, 2}, XIE Xian-li¹

(1 Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A method for estimating the total inputs of organic matter to farmland was proposed in the paper. A typical gully area of loess plateau region, Changwu County was selected as the study area. The organic matter input to farmland can be divided into four parts: the crop straw returned, the crop straw residues, the underground biomass from crop's root, and the organic fertilizer applied. Based on the LANDSAT 5 satellite remote sensing data, the net primary productivity (NPP) based on CASA model was estimated, and then the total biomass of crop was acquired. Combined with the crop root/shoot ratio, the weights of crop biomass above ground and underground biomass were estimated. The weight of straw residues and straw returned were estimated by biomass above ground and the date obtained through field survey. The results showed that the total organic matter input to farmland was 42 700 t per year in the study area.

Key words: Input of organic matter, CASA, Changwu County