

张燕,高翔,张洪. 基于双向因果关系探讨道路对营养物产出的贡献[J]. 江苏农业科学,2019,47(5):230-237.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.05.056

# 基于双向因果关系探讨道路对营养物产出的贡献

张燕,高翔,张洪

(南京大学地理与海洋科学学院,江苏南京 210023)

**摘要:**研究农业产出时,应关注影响产出的直接因素,同时不应忽视间接影响农业产出的因素,道路是一种影响农业产出的重要间接因素。借鉴二阶段最小二乘法(2SLS)的思想,根据道路建设与营养物产出之间的双向因果关系,建立联立方程,并探讨营养物主产区、主销区和产销平衡区的道路建设对营养物(能量、蛋白质、脂肪)产出的影响。结果表明,我国农业营养物净产出与道路通行里程间呈极显著正相关关系;营养物净产出与道路交通双向互动模型可以剥离出道路交通因素对营养物产出的影响。仅考虑直接投入因素,影响各区能量、蛋白质与脂肪产出的因素有所不同;从道路建设来看,影响各区铁路、公路建设的主要因素也存在差别;从对营养物产出的贡献来看,公路比铁路明显,且在主产区尤其明显,以 2015 年为例,公路建设对主产区能量、蛋白质净产出的贡献分别为 8.95%、8.60%,而铁路建设只有 1.52%、2.36%,通达便捷的公路网络促进了食物生产潜力的发挥。

**关键词:**道路建设;营养物产出;贡献;农业生产;联立方程

**中图分类号:**F542 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2019)05-0230-08

长期以来,人们在研究农业产出的影响因素时,多把注意力放在水、土、气、温等自然要素<sup>[1-4]</sup>和农业生产要素<sup>[5-8]</sup>等直接影响农业产出的因素上,也有对间接影响农业产出的因素进行探讨的研究<sup>[9-11]</sup>,但多不区分直接与间接影响因素。根据笔者的关注,间接因素对农业产出的影响同样不应被忽视,道路是众多间接影响农业产出的重要因素之一,其对农业产出的影响主要通过降低生产投入和运输成本、提高农产品商品化水平与农业技术效率、调整生产要素投入和产业结构加以体现。

现代农业生产从生产资料购置到农产品播种、收割、仓储、交易等环节都离不开交通运输。通达便捷的交通可降低农业生产要素的流动成本。例如,世界银行(World Bank)对越南的研究表明,运输成本降幅与农村公路改善状况呈正相关关系,改善公路平整度使得运输成本下降 12%~33%,还可加快技术扩散,提高农业技术使用效率;引进稀缺要素并输出冗余要素,可使生产要素向具有比较优势的产业和地区流动,实现农业生产要素的高效、优化配置;农业产出的增长与农产品的商品化,也需要交通运输的参与<sup>[12]</sup>。因此,有必要研究交通基础设施建设与食物供给的关系。农产品这类大宗产品的陆路运输主要依赖公路与铁路,因此本研究选择公路与铁路代表交通基础设施。

## 1 材料与方法

研究区域方面,在研究全国范围道路建设对营养物产出

影响的基础上,进一步细分营养物主产区、主销区和产销平衡区,探讨不同区域道路建设对营养物产出的影响,以使揭示的规律更具有针对性。指标选择方面,农业生产涵盖农林牧渔业,生产的食物种类繁多,用各种食物提供的能量、蛋白质、脂肪总量来反映农业产出,可以避免不同区域农业生产结构和不同食物提供营养物质的差异,以简化讨论。研究视角方面,定量探讨道路基础设施与食物提供的能量、蛋白质、脂肪之间的相关关系,并进一步估算道路建设对营养物产出的弹性系数,即评估道路建设增长对营养物产出增长的贡献程度。研究方法方面,借鉴二阶段最小二乘法(2SLS)<sup>[13]</sup>的思想,根据道路建设与营养物产出之间存在的双向因果关系,建立联立方程模型,基于省级多年数据,探讨不同区域道路建设对营养物产出的影响。

### 1.1 模型构建

参考文献[9]确立道路(包括公路与铁路)建设和食物生产之间的双向因果关系。由图 1 可知,一方面,通达的交通运输可加速农业生产的食物流通,降低运输成本,促进食物的商品化,进而刺激生产者扩大农产品生产,如何通过扩大再生产规模及提高单产等措施增加食物供给量,增加农民、牧民与渔民的收入及农林牧渔业总产值;另一方面,超过生产地当地需求的食物供给量要尽快转化为商品,这也增加了对快捷便利道路设施的需求,同时,农业经济的发展及农民增收又可以刺激政府与农民对道路建设的投资。

探讨道路建设与食物生产的关系时,仅用单一方程难以反映其内在的双向联系,导致估计结果有偏误。因此,需要建立食物生产和道路建设 2 个模型[式(1)],前者以影响食物生产的因素为解释变量,以食物提供的营养物(能量、蛋白质、脂肪)净产出量为被解释变量;后者以影响道路建设的因素为解释变量,以道路里程为被解释变量。2 个模型并列构成联立方程组,揭示营养物产出与社会经济系统中相关因素之间的即期和动态关系,能更合理地探讨道路对食物营养物

收稿日期:2017-11-15

基金项目:国家自然科学基金(编号:41271467,40771186,40930103)。

作者简介:张燕(1962—),女,江苏南京人,博士,副教授,主要从事资源与环境的教学与研究。E-mail:zhangynju@sina.com。

通信作者:张洪,博士,讲师,主要从事旅游规划与景观设计研究。

E-mail:zhongnju@nju.edu.cn。

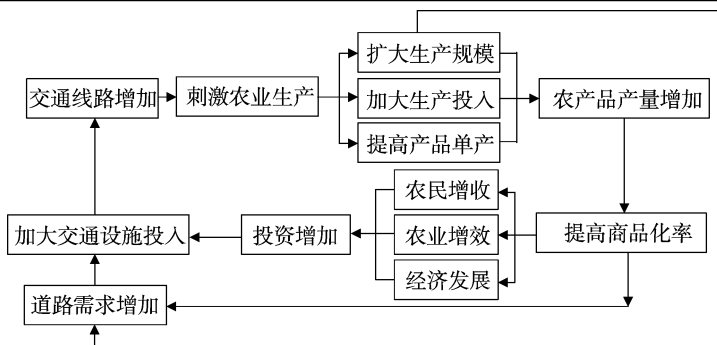


图1 道路建设与食物生产之间的双向因果关系

产出的影响。

$$N = f_1(X_N); \quad (1-a)$$

$$R = f_2(X_R, N). \quad (1-b)$$

式中： $N$  为营养物净产出量； $X_N$  为农业生产直接投入因素，即直接影响营养物产量的相关因素，主要包括耕地面积、农业劳动力、农业机械总动力、化肥（折纯）施用量、农药使用量及有效灌溉面积等； $R$  为道路建设水平，是间接影响农业生产的公路与铁路通行里程； $X_R$  为影响道路建设的相关因素，包括直接使用道路的因素，如需要借助道路从产地运输至销地的前一年可供区外利用的食物，需要通过道路运输到达农业生产地的农业生产要素等，还包括间接影响公路与铁路运行里程的因素，如前一年的财政支农支出、农林牧渔产出及农民家庭人均收入亦可改变对道路建设的投入。

通过复合营养物产出模型[式(1-a)]与道路建设模型[式(1-b)]得到营养物净产出与道路交通双向互动模型[式(1-c)]，借助互动模型可区分农业生产直接投入因素与道路建设对营养物净产出的不同影响。

$$N = f_3(\hat{N}, \hat{R}). \quad (1-c)$$

式中： $\hat{N}$ 、 $\hat{R}$  分别为式(1-a)、式(1-b)的拟合值，即单纯由农业生产直接投入决定的营养物净产出量拟合值、由营养物生产与经济发展决定的道路里程拟合值。

根据概念模型[式(1-a)至式(1-c)]，引入具体的影响因素，分别建立食物提供营养物净产出量模型[式(2)]、道路建设模型[式(3)]以及双向互动模型[式(4)]。

$$N_i(t) = \alpha_0 + \alpha_1 \times x_{1i}(t) + \alpha_2 \times x_{2i}(t) + \alpha_3 \times x_{3i}(t) + \alpha_4 \times x_{4i}(t) + \alpha_5 \times x_{5i}(t) + \alpha_6 \times x_{6i}(t) + \varepsilon_i(t); \quad (2)$$

$$R_i(t) = \beta_0 + \beta_1 \times v_i(t-1) + \beta_2 \times e_{1i}(t-1) + \beta_3 \times e_{2i}(t-1) + \beta_4 \times e_{3i}(t-1) + \beta_5 \times x_{2i}(t-1) + \beta_6 \times x_{3i}(t-1) + \beta_7 \times x_{4i}(t-1) + \beta_8 \times x_{5i}(t-1) + \beta_9 \times x_{7i}(t-1) + \beta_{10} \times x_{8i}(t-1) + \mu_i(t); \quad (3)$$

$$N_i(t) = \theta_0 + \theta_1 \times \hat{N}_i(t) + \theta_2 \times \hat{R}_{oi}(t) + \theta_3 \times \hat{R}_{mi}(t) + \tau_i(t). \quad (4)$$

式中： $N_i(t)$  表示  $i$  区域在第  $t$  年农业生产的食物提供的营养物净产出量； $x_{1i}(t)$ 、 $x_{2i}(t)$ 、 $x_{3i}(t)$ 、 $x_{4i}(t)$ 、 $x_{5i}(t)$ 、 $x_{6i}(t)$  为直接影响营养物净产出量的因素，分别为  $i$  区域在第  $t$  年的耕地面积、农业劳动力、农业机械总动力、化肥（折纯）施用量、农药使用量、有效灌溉面积； $R_i(t)$  为  $i$  区域在第  $t$  年的道路通行里程，实际分析中用  $i$  区域在第  $t$  年的公路通行里程  $R_{oi}(t)$  或铁路通行里程  $R_{mi}(t)$  表示； $v_i(t-1)$ 、 $e_{1i}(t-1)$ 、 $e_{2i}(t-1)$ 、

$e_{3i}(t-1)$ 、 $x_{2i}(t-1)$ 、 $x_{3i}(t-1)$ 、 $x_{4i}(t-1)$ 、 $x_{5i}(t-1)$ 、 $x_{7i}(t-1)$ 、 $x_{8i}(t-1)$  是影响公路与铁路建设水平的因素，分别为  $i$  区域在第  $t-1$  年的营养物调运量（包括能量、蛋白质、脂肪调运量）、财政支农支出、农林牧渔产出、农民家庭人均收入、农业劳动力、农业机械总动力、化肥（折纯）施用量、农药使用量、农膜使用量、农用柴油使用量； $\alpha_0$ 、 $\beta_0$ 、 $\theta_0$  为截距项，其实际意义表示在除了模型中考虑的因素之外的其他综合因素影响下的营养物净产出量、公路或铁路通行里程； $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\dots$ 、 $\alpha_6$ 、 $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 、 $\dots$ 、 $\beta_{10}$ 、 $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\theta_3$  是待估参数； $\hat{N}_i(t)$ 、 $\hat{R}_{oi}(t)$ 、 $\hat{R}_{mi}(t)$  分别为式(2)、式(3)的拟合值； $\varepsilon_i(t)$ 、 $\mu_i(t)$ 、 $\tau_i(t)$  分别为式(2)至式(4)的随机误差。式(2)、式(3)中各因素的待估参数由逐步回归法求出，式(4)则用普通最小二乘法求解。

人们食用农产品是要从中获取营养物，如能量、蛋白质、脂肪及各种微量元素，不同农产品的品质不同，即所含的营养物量不同；各地农业生产结构不同，且不同农产品产量相差很大，若用某种农产品如粮食或肉类等实物产量来评价农业生产能力，则区域间的比较缺少可比性与综合性。由于各种农产品都包含人需要的能量、蛋白质和脂肪，农产品提供的营养物又可以相互替代，因此，为全面综合地比较不同区域、时间、农业生产结构下的营养物产出，本研究参照文献[14]使用的方法计算各种农产品能够提供的能量、蛋白质与脂肪量。

农业生产提供的营养物（能量、蛋白质与脂肪）净产出量根据各地生产的可用作食物的农产品实物量（即从农产品总量中扣除种子、饲料用量后的实物量）及各种农产品平均包含的营养物量计算。

$$N_i(t) = \sum_{j=1}^9 \varphi_j \times M_{ij}(t). \quad (5)$$

式中： $M_{ij}(t)$  为  $i$  区域在第  $t$  年扣除种子与饲料用量后第  $j$  种农产品的实物量； $\varphi_j$  为单位质量第  $j$  种农产品包含的营养物量，其取值参照文献[15]； $j$  为农产品种类，包括粮食、油料、糖料、蔬菜、水果等植物性产品及肉类、蛋、奶和水产品等动物性产品。

营养物调运量  $v_i(t)$  是从本区农业净产出的营养物量 [ $N_i(t)$ ] 中扣除本区人口消费的营养物量 [ $N_{hi}(t)$ ] 后得到的剩余营养物量。当  $v_i(t) > 0$  时，表示本区生产的营养物量可销往区外；当  $v_i(t) < 0$  时，表示供养本区人口需从区外输入营养物，即

$$v_i(t) = N_i(t) - N_{hi}(t). \quad (6)$$

式中： $N_{hi}(t)$  是按一定生活标准供养本区人口需要的营养物量，按式(7)进行计算。

$$N_{ii}(t) = N_e \times P_i(t). \quad (7)$$

式中:  $N_e$  为在一定生活标准下人均年需摄入的营养物量, 2001—2015 年以《中国食物与营养发展纲要(2001—2010 年)》<sup>[16]</sup> 提出的营养素摄入量目标为依据取值, 1990—2000 年根据我国实际情况, 以 2001—2010 年标准的 90% 设定营养素摄入量取值;  $P_i(t)$  为  $i$  区域第  $t$  年的人口。

若  $N_i(t) > N_{ii}(t)$ , 则表示本区农业生产的营养物量不仅可自给自足, 还可外销, 因而是营养物主产区; 若  $N_i(t) < N_{ii}(t)$ , 则表示本区农业生产的营养物量不能自给, 要供养本区人口需要须从区外购买食物, 因而是营养物主销区。回归计算时,  $v_i(t)$  取绝对值。

数据取自然对数不改变原有变量间的关系, 且可减少趋势因素的影响以及可能存在的异方差现象(即随着自变量增加, 因变量的方差也增大的现象)。为使数据更平稳, 在实证研究中, 所有变量均进行自然对数变换, 即本研究模型的实质是双对数函数, 因此待估参数实际是方程中对应解释变量对被解释变量的产出弹性系数, 如可以用式(2)分析农业直接生产投入增长与营养物净产出增长间的变动关系, 用式(4)分析道路建设增长与营养物净产出增长间的变动关系。

### 1.2 研究分区

我国幅员辽阔, 社会经济发展水平、农业资源禀赋差异很大。因此, 本研究划分出营养物主产区、主销区与平衡区, 按我国各省农业净产出营养物量占全国农业净产出量的比重从大到小排序, 并计算累积比重, 将累积比重超过 67% 的区域作为食物营养物的主产区, 这些地区在绝大多数(超过 82%) 年份不仅能自给, 还有大量余量供给区外, 包括黑龙江、山东、河南、吉林、内蒙古、安徽、湖北、河北、四川、湖南、江西、辽宁、江苏等 13 省(自治区), 主要位于我国东北、华北、东南等农业自然资源禀赋较好、农业经济相对发达的地区, 面积约  $378.7 \times 10^4 \text{ km}^2$ ; 比重从小到大排序, 将累积比重低于 15% 且食物营养物不能自给的年份超过 65% 的区域作为食物营养物主销区, 包括北京、上海、天津、广东、浙江、海南、福建等 7 省(市), 主销区的农业均为非主导产业, 人口密集, 经济发达, 主要位于我国东南沿海地区, 面积最小, 约  $47.2 \times 10^4 \text{ km}^2$ ; 将比重在 16%~25% 之间且食物营养物自给自足的年份超过 57% 的区域作为产销平衡区, 包括山西、广西、重庆、云南、贵州、西藏、陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆等 11 省(市、自治区), 主要位于我国西北与西南地区, 农业自然资源禀赋较差, 农业经济发展较其他省(市、自治区)相对落后, 面积最大, 约  $535.2 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。该分区与我国的粮食主产区、主销区与平衡区划分结果<sup>[17]</sup>一致。

### 1.3 数据来源

研究时间为 1990—2015 年, 共 26 年, 所用变量的原始数据来源于《中国统计年鉴》<sup>[18]</sup>、《中国农村统计年鉴》<sup>[19]</sup> 和《中国交通运输统计年鉴》<sup>[20]</sup>, 并将我国大陆 31 个省(市、自治区)的原始数据按营养物主产区、主销区与平衡区进行归并。

## 2 结果与分析

### 2.1 农业生产的营养物量与道路建设水平的相关性分析

为直观地观察我国农业营养物净产出量和道路建设水平间的相关性, 绘制 1990—2015 年我国农业营养物净产出产量

和道路通行里程演变图。从图 2、图 3 可以看出, 农业产出的营养物量与道路建设水平的变动高度一致。经计算, 公路与能量、蛋白质、脂肪净产出量间的相关系数分别为 0.703、0.887、0.965, 铁路与它们之间的相关系数分别为 0.894、0.944、0.885, 相关系数均在 0.01 水平(双侧)上显著相关, 表明我国农业营养物净产出量与道路建设呈极显著正相关关系, 道路交通与农业生产相互促进。

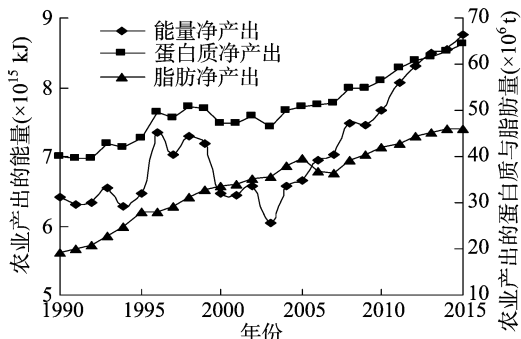


图2 我国农业营养物净产出量

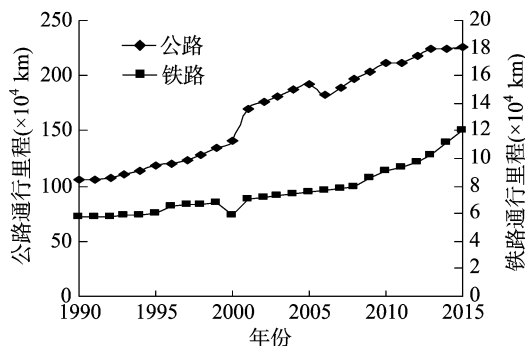


图3 我国公路与铁路通行里程

### 2.2 营养物产出模型中引入道路因素的必要性

用逐步回归方法求解农业生产直接投入因素对营养物净产出的影响, 被引入模型的因素至少能在 0.05 显著水平上通过  $t$  检验, 参数估计结果见表 1; 各区域能量、蛋白质与脂肪产出模型均在 0.001 显著水平上通过  $F$  检验, 模型整体拟合优度较好, 大部分变量系数与预期一致。

从表 1 可以看出, 营养物主产区、产销平衡区与主销区的截距均  $> 0$ , 表明除研究中考考虑的耕地面积、农业劳动力、农业机械总动力、化肥(折纯)施用量、农药使用量及有效灌溉面积等 6 个直接投入因素外, 还有其他未纳入模型的因素对营养物产出有积极贡献, 换言之, 仅考虑 6 个常规农业生产投入因素对营养物产出的影响, 式(1-a)或式(2)可能存在偏误, 需增加对营养物产出具有影响的其他因素(如道路里程), 以降低模型的偏误, 并由此进一步探讨这些因素对营养物产出的影响程度。

从不同营养物角度来看, 主产区、产销平衡区截距均是能量产出最大, 其次是脂肪产出, 蛋白质产出最小, 主销区截距从大至小的排序却是脂肪、蛋白质、能量产出; 从不同区域来看, 能量与蛋白质产出的截距由大至小排序均是产销平衡区、主产区、主销区, 脂肪产出的截距由大至小排序是产销平衡区、主销区、主产区。表明除 6 个农业生产投入因素之外的其他因素对营养物(能量、蛋白质与脂肪)净产出的影响不但程

表 1 农业生产直接投入因素对营养物净产出影响的模型结果

区域	因素	能量产出	蛋白质产出	脂肪产出
主产区	截距	8.75(33.43)	5.86(25.50)	7.65(42.94)
	耕地面积	0.63(17.16)	0.62(19.62)	—
	农业劳动力	0.10(4.62)	0.04(2.20)	0.19(8.61)
	农业机械总动力	-0.13(-5.41)	—	0.28(10.64)
	化肥(折纯)施用量	0.36(7.35)	0.30(7.67)	0.52(14.46)
	农药使用量	0.12(4.05)	0.17(7.19)	—
	有效灌溉面积	—	-0.12(-3.43)	-0.24(-5.74)
产销平衡区	截距	11.12(47.22)	7.53(33.79)	8.11(24.27)
	耕地面积	0.11(2.92)	0.21(6.01)	-0.43(-8.15)
	农业劳动力	0.21(7.62)	0.14(5.20)	0.45(11.51)
	农业机械总动力	-0.18(-7.84)	-0.12(-5.43)	0.10(3.12)
	化肥(折纯)施用量	0.56(19.87)	0.54(20.07)	0.33(8.25)
	农药使用量	0.16(8.11)	0.13(7.15)	0.13(4.76)
	有效灌溉面积	0.05(1.67)	-0.06(-2.05)	0.17(4.03)
主销区	截距	4.37(15.04)	5.39(24.21)	7.86(28.49)
	耕地面积	1.32(14.04)	0.14(2.05)	-0.49(-5.96)
	农业劳动力	—	0.23(3.85)	0.20(2.83)
	农业机械总动力	-0.72(-7.35)	—	0.17(4.31)
	化肥(折纯)施用量	—	—	0.54(9.77)
	农药使用量	—	0.20(7.77)	0.11(3.05)
	有效灌溉面积	0.84(6.56)	0.48(15.02)	0.25(4.78)

注:括号内为 *t* 统计量;“—”表示相关因素未引入模型。表 2 同。  
度存在差异,而且在区域间也存在差异。

因此,本研究在道路建设与营养物生产双向因果关系的基础上,增添道路交通因素,建立联立方程组,即式(1-a)至式(1-c)或式(2)至式(4),以期定量了解道路建设与营养物生产之间的相互影响及区域间的差异。

2.3 6 个农业生产直接投入因素对不同地区营养物产出的影响

2.3.1 营养物主产区 由表 1 可知,耕地面积对主产区能量与蛋白质的产出有重要影响,其影响程度位居 6 个农业生产直接投入因素之首,化肥(折纯)施用量、农药使用量与农业劳动力投入分别位列第 2、3、4;对脂肪产出所起作用由大至小排列的农业投入因素是化肥(折纯)施用量、农业机械总动力、农业劳动力,耕地面积未能引入脂肪产出模型,原因可能是 1990—2015 年该区脂肪产出更多来自养殖业与渔业,这一时期动物性食物提供的脂肪占食物提供脂肪总量的比重平均为 56.24%。尽管农业机械化水平不断提高,单位播种面积农业机械总动力投入从 1990 年的 1.92 kW/hm<sup>2</sup> 增至 2015 年的 7.09 kW/hm<sup>2</sup>,但相比农业发达国家,农业机械装备种类结构不合理,农业机械总动力投入不足,制约了农机效率与效益的提高,原因可能与充足的农业劳动力降低了农业生产对农业机械的需求有关,家庭联产承包经营制、土地按人口平均分配造成耕地破碎化,也阻碍了农机的使用与农业劳动生产率的提高,制约着农业机械化与现代化的发展,因此,农业机械总动力的投入对能量的产出弹性 <0,且未能引入蛋白质产出模型,仅对脂肪的产出有积极贡献(弹性系数为 0.28,位列第 2)。1990—2015 年主产区农业平均灌溉率为 46.38%,与农业发达国家相比,灌溉设施投资较低,农田灌溉率不足,且灌溉设施管护滞后,降低了灌溉设施功能,因而有效灌溉面积未能进入能量产出模型;而对蛋白质与脂肪的产出弹性均 <0,

原因可能是该区的蛋白质与脂肪有很大部分来自养殖业,对灌溉的依赖不大。

2.3.2 营养物产销平衡区 由表 1 可知,耕地面积对产销平衡区能量、蛋白质产出的影响程度分别位居第 4、2,但对脂肪产出弹性 <0;农业劳动力投入对能量、蛋白质、脂肪产出的影响程度分别位居第 2、3、1;1990—2015 年单位播种面积农业机械总动力投入平均为 3.21 kW/hm<sup>2</sup>,充足的农业劳动力及破碎的耕地限制了农机的使用,致使农业机械总动力投入对该区能量与蛋白质的产出弹性 <0,对脂肪产出有促进作用(弹性系数为 0.10);化肥(折纯)施用量对能量与蛋白质的产出有重要影响,位居该区农业直接投入因素之首,对脂肪产出的影响位居第 2;农药使用量对能量、蛋白质、脂肪产出的影响程度分别位居第 3、4、4;该区多位于干旱与半干旱区域,灌溉设施的改善对提高营养物产出非常重要,对能量与脂肪产出有促进作用,其影响程度分别位居第 5、3,但对蛋白质产出弹性 <0。

2.3.3 营养物主销区 耕地面积对主销区能量与蛋白质产出的弹性 >0,其中对能量产出的弹性系数高达 1.32,即耕地面积增加 1%,能量产出增加 1.32%,位居 6 个因素之首,因而保护耕地对保障该区能量与蛋白质产出至关重要,但耕地面积对脂肪产出的弹性却 <0,原因是该区脂肪产出主要不依赖耕地,而是更多来自养殖业与渔业,1990—2015 年该区动物性食物提供的脂肪占食物提供脂肪总量的比重从 57.11% 增至 79.63%。农业劳动力未能引入能量产出模型,但对蛋白质与脂肪产出的弹性均 >0,分别位居第 2、3,原因在于 1990—2015 年蛋白质与脂肪产出更多来自养殖业与渔业,这一时期动物性食物提供的蛋白质与脂肪在食物提供蛋白质与脂肪总量中的占比以 3.94% 与 1.20% 的速度增长,平均为 50.34% 与 72.31%,而我国的养殖业与渔业是劳动密集型产

业,如 2015 年平均每头生猪、肉牛、肉羊家庭用工 4.08、11.98、5.34 d<sup>[21]</sup>,正弹性系数说明劳动力投入有助于提高该区蛋白质与脂肪的产出。农业机械总动力投入对能量产出的弹性<0,且未能引入蛋白质产出模型,但对脂肪产出却有积极贡献(弹性系数为 0.17,位列第 4),表明农业机械总动力投入对该区种植业的贡献未能体现,但农机的使用可提高该区养殖业与渔业的劳动生产率。3 个区域相比,主销区的单位面积化肥施用量最高,从 1990 年的 254.12 kg/hm<sup>2</sup> 增至 2015 年的 499.47 kg/hm<sup>2</sup>,其次是主产区,从 1990 年的 176.06 kg/hm<sup>2</sup> 增至 2015 年的 357.87 kg/hm<sup>2</sup>,但过高的化肥(折纯)施用量却导致其不能引入主销区能量、蛋白质产出模型,表明化肥的过度使用严重透支了土壤肥力和生态环境,随着化肥投入的增多,土壤环境恶化,化肥对该区能量、蛋白质产出的贡献不升反降,且可能通过食物链降低食物品质,化肥(折纯)施用量对脂肪产出的弹性系数为 0.54,位居第 1。该区单位面积农药使用量为 19.56 kg/hm<sup>2</sup>,比主产区、产销平衡

区分别高 10.76、14.76 kg/hm<sup>2</sup>,此因素亦未能进入能量产出模型,但对蛋白质与脂肪产出的影响均为正,分别位居第 3、5,说明农药投入可有效防治病虫害与有害生物的危害。农田水利设施建设有利于减轻自然灾害的危害,有效的农田灌溉在营养物生产中发挥着积极、促进作用,1990—2015 年该区农业平均灌溉率为 61.25%,分别比主产区、产销平衡区高 14.87%、29.85%,有效灌溉面积对能量、蛋白质、脂肪产出的弹性均>0,分别位居 6 个因素的第 2、1、2 位。

2.4 营养物产出与农业经济发展对道路建设的影响  
采用逐步回归方法求解营养物产出与农业经济发展对道路建设影响的模型,被引入模型的因素至少能在 0.05 显著水平上通过 *t* 检验;模型在 0.001 显著水平上通过 *F* 检验,模型整体拟合优度较好,大部分变量系数与预期一致,参数估计结果见表 2。

2.4.1 主产区 从表 2 可以看出,该区的农业劳动力及财政支农支出可引入公路模型,且弹性均>0,分别位居第 1、2,表

表 2 营养物产出与农业经济发展对道路建设影响的模型结果

区域	因素	公路通行里程			铁路通行里程		
		<i>R<sub>oE</sub></i>	<i>R<sub>oP</sub></i>	<i>R<sub>oF</sub></i>	<i>R<sub>wE</sub></i>	<i>R<sub>wP</sub></i>	<i>R<sub>wF</sub></i>
主产区	截距	9.07(57.00)	9.07(57.00)	9.07(57.00)	7.18(11.00)	7.29(11.99)	6.75(23.43)
	营养物调运量	—	—	—	0.08(2.72)	0.11(3.43)	0.05(3.48)
	财政支农支出	0.22(18.10)	0.22(18.10)	0.22(18.10)	0.20(5.23)	0.20(5.22)	0.12(8.32)
	农林牧渔业产出	—	—	—	—	—	—
	农民家庭人均收入	—	—	—	-0.15(-2.23)	-0.18(-2.7)	—
	农业劳动力	0.31(9.21)	0.31(9.21)	0.31(9.21)	—	—	—
	农业机械总动力	—	—	—	0.36(5.74)	0.39(6.18)	0.35(5.83)
	化肥(折纯)施用量	-0.21(-4.92)	-0.21(-4.92)	-0.21(-4.92)	-0.51(-6.49)	-0.52(-6.79)	-0.43(-6.02)
	农药使用量	—	—	—	-0.30(-6.73)	-0.29(-6.47)	-0.35(-8.89)
	农膜使用量	—	—	—	—	—	—
产销平衡区	截距	8.72(12.58)	8.26(12.56)	8.23(14.61)	4.28(3.04)	-4.39(-4.94)	-1.38(-1.97)
	营养物调运量	-0.10(-3.53)	-0.09(-3.23)	—	-0.22(-2.73)	0.38(5.15)	—
	财政支农支出	—	—	—	0.40(3.22)	—	—
	农林牧渔业产出	0.82(8.69)	0.78(8.24)	0.85(9.33)	-1.27(-5.61)	-0.90(-7.14)	-0.70(-5.57)
	农民家庭人均收入	-0.44(-4.43)	-0.37(-3.64)	-0.50(-5.33)	—	—	—
	农业劳动力	0.24(3.18)	0.24(3.24)	0.19(2.83)	—	—	—
	农业机械总动力	0.38(4.65)	0.31(3.40)	0.48(6.24)	0.60(2.47)	1.59(7.78)	1.19(6.01)
	化肥(折纯)施用量	-0.91(-9.93)	-0.92(-10.02)	-0.94(-11.48)	0.93(3.78)	—	—
	农药使用量	—	—	—	—	—	—
	农膜使用量	0.07(2.04)	0.08(2.41)	—	0.34(4.01)	0.24(3.20)	0.38(5.26)
主销区	截距	2.84(7.61)	4.60(15.34)	7.00(9.18)	3.13(4.50)	3.13(4.50)	1.40(2.54)
	营养物调运量	0.12(4.32)	—	0.24(9.61)	—	—	0.09(4.46)
	财政支农支出	—	0.23(10.45)	0.11(2.01)	0.31(6.26)	0.31(6.26)	0.21(6.13)
	农林牧渔业产出	0.40(9.83)	—	0.82(13.75)	—	—	—
	农民家庭人均收入	—	—	-0.57(-7.66)	-0.31(-3.34)	-0.31(-3.34)	-0.14(-2.25)
	农业劳动力	0.55(13.10)	0.82(9.72)	—	—	—	—
	农业机械总动力	0.19(3.41)	—	0.21(4.15)	0.80(17.08)	0.80(17.08)	0.80(18.32)
	化肥(折纯)施用量	—	0.26(2.41)	—	—	—	—
	农药使用量	—	-0.23(-3.62)	—	-0.10(-2.19)	-0.10(-2.19)	—
	农膜使用量	—	—	-0.06(-2.88)	0.14(6.91)	0.14(6.91)	0.13(6.69)
主销区	截距	-0.34(-6.66)	-0.23(-5.21)	-0.24(-4.82)	-0.37(-7.13)	-0.37(-7.13)	-0.45(-11.79)

注:营养物调运量包括能量、蛋白质、脂肪调运量;*R<sub>oE</sub>*、*R<sub>oP</sub>*、*R<sub>oF</sub>*分别为能量、蛋白质、脂肪调运量对公路里程的影响;*R<sub>wE</sub>*、*R<sub>wP</sub>*、*R<sub>wF</sub>*、分别为能量、蛋白质、脂肪调运量对铁路里程的影响。

明农业劳动力流动依赖公路运输,财政支农支出对公路建设有促进作用;而营养物调运量、农林牧渔产出、农民家庭人均收入、农业机械总动力、农药使用量、农膜使用量及农用柴油使用量等因素未能引入公路模型,表明相比其他因素,这些因素对公路的需求与促进还未体现;化肥(折纯)施用量对公路通行里程的弹性 $<0$ ,可能表明化肥不是主产区公路建设的主要拉动因素。

农业机械总动力、财政支农支出、农用柴油使用量与营养物调运量可引入铁路模型,且弹性均 $>0$ ,位居前四,表明在该区域,财政支农支出对铁路建设有促进作用,营养物的调配及商品化、营养物生产中农业机械的投入以及由此引致的对农用柴油的需求投入主要依赖铁路运输;农林牧渔产出、农业劳动力、农膜使用量未能引入铁路模型;化肥(折纯)施用量、农药使用量、农民家庭人均收入弹性 $<0$ ,表明这些因素对该区铁路建设促进作用还未体现。

**2.4.2 产销平衡区** 该区能量、蛋白质调运量对公路建设的弹性 $<0$ ,脂肪调运未能引入公路模型,原因可能在于该区大多数营养物在多数年份基本达到自给自足,对公路的需求不迫切;财政支农支出与农药使用量未引入公路模型;农林牧渔产出、农业机械总动力、农业劳动力及农用柴油使用量则可引入公路建设模型,且弹性 $>0$ ,分别位居第1、2、3、4;该区能量及蛋白质生产中,使用的农膜需要通过公路运输,对公路建设的弹性 $>0$ ;主产区、平衡区、主销区1990—2015年农民家庭平均年收入分别为51 061、30 635、44 146元/人<sup>[18]</sup>,且在3个区中,该指标全部或部分未引入公路建设模型,而引入模型部分的弹性为负,可能是由于目前的人均收入并非该区公路建设的主要拉动因素;化肥(折纯)施用量对公路建设的弹性 $<0$ ,可能是由于该区的化肥运输主要不是依赖公路。

能量调运对铁路建设的弹性 $<0$ ,蛋白质调运量对铁路建设的弹性 $>0$ ,而脂肪调运量未引入铁路模型。农业机械总动力、农用柴油使用量与农膜使用量可引入铁路模型,且弹性 $>0$ ,营养物生产中的农业机械需要铁路运输,此需求可促进铁路建设,在能量、蛋白质、脂肪生产中农业机械总动力对铁路建设的弹性系数在所有影响铁路建设需求因素中分别位居第2、1、1;该区农业机械总动力投入引致的对农用柴油的需求主要依赖铁路运输,其在能量、蛋白质、脂肪生产中对铁路通行里程的弹性分别位居第3、4、2;农膜使用量在能量、蛋白质、脂肪生产中对铁路通行里程的弹性分别位居第5、3、3,原因可能与产销平衡区主要位于干旱半干旱地区有关,农用薄膜的使用可有效增加该区域的营养物产出,同时也需要从区内外调运农膜。该区化肥(折纯)使用量与财政支农支出仅在能量生产中对铁路有需求,分别位居第1、3。农民家庭人均收入、农业劳动力与农药使用量未引入铁路模型。农林牧渔产出对铁路通行里程的弹性 $<0$ ,表明该区农业产出的增长没有拉动本区铁路投资的增加。

**2.4.3 主销区** 该区能量与脂肪调运量对公路建设的弹性均 $>0$ ;财政支农支出、农林牧渔产出、农业劳动力、农业机械总动力、化肥(折纯)施用量可部分引入公路模型,且这些因素的弹性系数均 $>0$ ,表明该区的农业劳动力流动、农业机械及化肥主要依赖公路运输,财政支农支出及农林牧渔产出的增长增加了对公路的需求,对公路建设有促进作用;农民家庭

人均收入及农药使用量、农膜使用量、农用柴油使用量可部分或全部引入公路模型,但其弹性均 $<0$ ,表明农民家庭人均收入不是该区公路建设的主要拉动因素,营养物生产中使用的农药、农膜、农用柴油可能也不是主要依赖公路运输。

脂肪调运量对铁路通行里程的弹性 $>0$ ,表明其输入该区的工具可能主要依赖铁路运输;农业机械总动力、财政支农支出、农膜使用量均可引入铁路模型,且弹性 $>0$ ,位居前3,表明财政支农支出可增加基础建设投资,对铁路建设有促进作用,且该区的农业机械与农用薄膜主要依赖铁路运输;农林牧渔产出、农业劳动力、化肥(折纯)施用量均未引入铁路模型;农民家庭人均收入与农用柴油对铁路通行里程的弹性均 $<0$ ;在能量与蛋白质生产中,农药使用量对铁路通行里程的弹性 $<0$ 。

**2.5 双向互动模型基础上农业投入、公路与铁路建设对营养物产出的影响**

根据式(2)求出6个农业生产直接投入因素的营养物净产出拟合值,由式(3)求出公路通行里程与铁路通行里程的拟合值,再用普通最小二乘法求解营养物生产与道路建设双向互动方程[式(4)],得到复合农业生产投入因素与道路建设因素的能量、蛋白质与脂肪产出模型的待估参数(表3),模型调整后的判别系数为0.800~0.984,均能在0.001显著水平上通过 $F$ 检验,大部分参数估计达到统计显著水平,且变量系数与预期一致,说明模型的整体拟合效果较好,能反映变量间存在的规律。

随着道路建设投入的增加,1990—2015年,我国的公路里程从 $105.21 \times 10^4$  km增至 $226.44 \times 10^4$  km,公路密度从 $1100$  km/万 $\text{km}^2$ 提高到 $2400$  km/万 $\text{km}^2$ ;铁路里程从 $5.81 \times 10^4$  km增至 $12.08 \times 10^4$  km,铁路密度从 $60$  km/万 $\text{km}^2$ 提高到 $130$  km/万 $\text{km}^2$ ,公路与铁路通行里程的年平均增长率差异不大,分别为2.99%与2.85%,但公路要比铁路密集与发达,公路密度是铁路密度的21.7倍。

从表3可以看出,常规农业投入对营养物净产出的弹性均为正,在产销平衡区与主销区,其对能量净产出的弹性最大,蛋白质产出次之,脂肪产出最小,对能量与蛋白质净产出的弹性甚至 $>1$ ,表明2个区域营养物净产出主要依赖于农业投入,但同一区域的农业投入对能量、蛋白质、脂肪净产出的贡献不同,且区域间存在差异,主销区农业投入对营养物产出贡献整体最大,产销平衡区次之,主产区最低。但主销区的农业投入对营养物净产出的效益已趋于极限,因而要严格保护该区耕地资源,产销平衡区与主产区还有通过提高农业生产投入增加营养物净产出的余地。

公路通行里程对营养物净产出的影响存在明显的区域差异。在主产区,公路通行里程对营养物净产出的弹性均 $>0$ ,且对脂肪净产出的弹性最大,能量次之,蛋白质最小,表明公路建设对该区营养物净产出的增加有促进作用;在产销平衡区与主销区,公路通行里程对能量、蛋白质净产出的弹性均 $<0$ ,仅对脂肪净产出的弹性 $>0$ 。

铁路通行里程对营养物净产出的影响也存在明显的区域差异。在主产区,铁路通行里程对能量、蛋白质净产出的弹性 $>0$ ;在产销平衡区,对能量、蛋白质、脂肪净产出的弹性均 $<0$ ;在主销区,对能量、脂肪净产出的弹性 $>0$ ,对蛋白质净

表 3 复合农业生产投入因素与道路建设因素的营养物净产出模型结果

区域	因素	营养物净产出		
		能量	蛋白质	脂肪
主产区	截距	-1.23 ** (-2.34)	-0.97 *** (-2.69)	-1.68 *** (-5.36)
	常规农业投入	0.98 *** (31.39)	0.97 *** (36.47)	0.81 *** (33.55)
	公路通行里程	0.12 *** (3.35)	0.09 *** (2.84)	0.41 *** (10.54)
	铁路通行里程	0.03 (1.10)	0.04 (1.60)	-0.07 *** (-3.12)
产销平衡区	截距	0.02 (0.10)	0.11 (0.63)	-1.12 *** (-4.28)
	常规农业投入	1.05 *** (70.75)	1.03 *** (64.98)	0.96 *** (32.84)
	公路通行里程	-0.05 ** (-2.33)	-0.03 (-1.40)	0.17 *** (4.79)
	铁路通行里程	-0.03 *** (-2.73)	-0.01 (-1.37)	-0.04 *** (-2.73)
主销区	截距	-0.37 (-0.80)	0.11 (0.90)	0.16 (1.06)
	常规农业投入	1.28 *** (18.06)	1.09 *** (36.42)	0.81 *** (21.03)
	公路通行里程	-0.45 *** (-3.88)	-0.07 ** (-2.00)	0.15 *** (4.53)
	铁路通行里程	0.15 * (1.78)	-0.05 ** (-2.01)	0.05 * (1.80)

注:括号内为 *t* 统计量; \*、\*\*、\*\*\* 分别表示在 0.05、0.01、0.001 水平上显著。

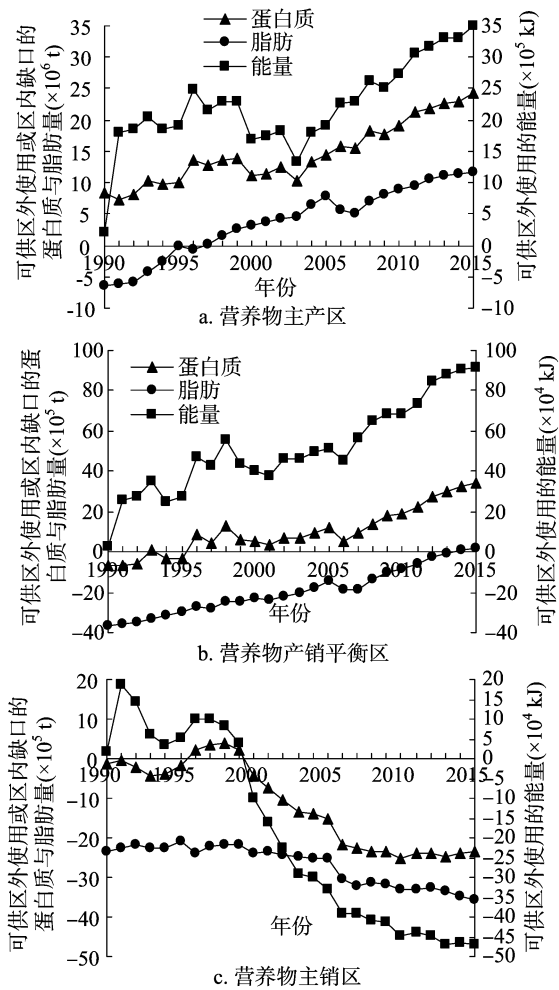


图4 营养物主产区、产销平衡区与主销区可供区外或区内需求的营养物量

产出的弹性 < 0。

主产区有大量营养物需输出,1990—2015 年,主产区平均每年可向区外输出的能量、蛋白质、脂肪分别为  $2.30 \times 10^{15}$  kJ、 $1.46 \times 10^7$  t、 $3.73 \times 10^6$  t;为克服资源禀赋的不足,需向区内输入大量农用物资,1990—2015 年,年均农业生产需要化肥(折纯量)、农药、农用塑料薄膜、农用柴油分别为

$3.07 \times 10^7$ 、 $9.33 \times 10^5$ 、 $1.01 \times 10^6$ 、 $9.57 \times 10^6$  t,农产品的商品化及农用物资的需求均依赖道路运输支撑,研究结果(表 3)表明,道路对该区的营养物生产整体有积极促进作用,该区公路通行里程对营养物净产出的弹性远高于铁路通行里程。该区经济与农业均较发达,但 1990—2015 年农林牧渔业总产值占国内生产总值(GDP)的比重则在下降,1990 年为 43.7%,2015 年为 17.5%,平均为 27.7%;道路交通建设较好,1990—2015 年平均公路、铁路密度分别为 174.79、9.58 km/万  $\text{km}^2$ ,公路密度与铁路密度的比是 18.25,且公路比铁路交通更便捷,因此,农用物资的调入与营养物的调出更依赖公路运输,公路建设对该区营养物净产出增长的贡献比铁路大,如 2015 年公路建设对主产区能量与蛋白质净产出的贡献分别为 8.95% 与 8.60%,而铁路建设只有 1.52% 与 2.36%。

主销区经济发达,人口密集,土地资源稀缺,农林牧渔业总产值占 GDP 的比重平均为 14.6%,并以年均 5.49% 的速率降低,因此,该区存在大量的营养物需求缺口(即图 4 中的负值),要靠从区外输入营养物来弥补,特别是 2000 年后,年均需输入能量、蛋白质、脂肪  $3.60 \times 10^{14}$  kJ、 $1.88 \times 10^6$  t、 $2.97 \times 10^6$  t,方可满足区内人口的需求;1990—2015 年,该区平均每年农业生产分别需要化肥(折纯量)、农药、农膜、农用柴油  $4.92 \times 10^6$ 、 $2.50 \times 10^5$ 、 $1.58 \times 10^5$ 、 $3.31 \times 10^6$  t,农产品与农用物资的输入均依赖道路运输;该区交通最为发达,1990—2015 年平均公路、铁路密度分别为 748.28、22.74 km/万  $\text{km}^2$ ,研究结果(表 3)表明,该区铁路通行里程对能量及脂肪净产出、公路通行里程对脂肪净产出的弹性 > 0,其中铁路通行里程对能量净产出的弹性较大(弹性系数为 0.15),可能是由于在远距离大宗农产品及大批农用物资运输中,铁路比公路更有效率。

产销平衡区幅员辽阔,经济相对落后,农业占重要地位,农林牧渔业总产值占 GDP 的比重平均为 29.7%,农业生产需要输入大量农用物资,1990—2015 年,平均每年区内农业生产分别需要化肥(折纯量)、农药、农膜、农用柴油  $9.24 \times 10^6$ 、 $1.83 \times 10^5$ 、 $4.02 \times 10^5$ 、 $2.91 \times 10^6$  t。由图 4 可见,1990—2015 年,该区自产的能量能保证区内自给且有部分盈余,蛋白质产出从 1996 年起能满足区内需求并有盈余;区内脂肪产出不断



增加,2014年起能够自给。该区公路通行里程仅对脂肪净产出的弹性 $>0$ ,公路通行里程对能量与蛋白质净产出以及铁路通行里程对各种营养物净产出的弹性均 $<0$ ,原因可能在于该区交通基础设施建设相对滞后,公路、铁路密度在3个区域中最低,分别只有93.03、3.66 km/万 km<sup>2</sup>,道路建设对营养物产出的作用还未显现。

总体来看,公路通行里程对营养物产出的弹性高于铁路,在主产区尤其明显,即公路建设对营养物产出的贡献整体比铁路明显,可能是由于公路运输灵活方便,适合小规模货物运输,且我国公路网比铁路网更为发达,通达便捷的公路网络促进了食物生产潜力的发挥,但道路交通对营养物净产出存在显著区域差异。

### 3 结论

在确立道路建设和食物生产双向因果关系的基础上,建立营养物产出与道路建设联立方程组,并据此建立营养物净产出与道路交通双向互动模型,从而剥离出道路交通因素对营养物产出的影响。

我国农业营养物净产出与道路通行里程间呈极显著正相关关系,表明道路交通与农业生产相互促进。从营养物产出模型模拟结果看,有必要引入道路因素,以降低模型的偏误。

单看农业生产直接投入因素,在主产区,影响能量与蛋白质产出的依次是耕地面积、化肥(折纯)施用量、农药使用量与农业劳动力,影响脂肪产出的依次是化肥(折纯)施用量、农业机械总动力与农业劳动力。在产销平衡区,影响能量产出的依次是化肥(折纯)施用量、农业劳动力、农药使用量、耕地面积与有效灌溉面积,影响蛋白质产出的依次是化肥(折纯)施用量、耕地面积、农业劳动力、农药使用量,影响脂肪产出的依次是农业劳动力、化肥(折纯)施用量、有效灌溉面积、农药使用量与农业机械总动力。在主销区,影响能量产出的依次是耕地面积与有效灌溉面积,影响蛋白质产出的依次是有效灌溉面积、农业劳动力、农药使用量与耕地面积,影响脂肪产出的依次是化肥(折纯)施用量、有效灌溉面积、农业劳动力、农业机械总动力与农药使用量。

从营养物产出与农业经济发展对道路建设影响的模拟结果来看,尽管存在区域间差异,能引入道路模型,且弹性 $>0$ 的因素均与区域农业生产、经济发展密切相关。从农业角度来看,主产区影响铁路建设的主要因素有农业机械总动力、财政支农支出以及能量、蛋白质、脂肪调运量与农用柴油使用量,影响公路建设的主要因素是农业劳动力与财政支农支出。主销区影响铁路建设的主要因素有农业机械总动力、财政支农支出、农膜使用量与脂肪调运量,影响公路建设的主要因素有农业劳动力、农林牧渔产出、脂肪调运量、化肥(折纯)使用量、农业机械总动力、财政支农支出与能量调运量。产销平衡区影响铁路建设的主要因素有农业机械总动力、蛋白质调运量、化肥(折纯)施用量、农膜使用量、农用柴油使用量及财政支农支出,影响公路建设的主要因素有农林牧渔产出、农业机械总动力、农业劳动力、农用柴油使用量及农膜使用量。

从对营养物产出的贡献来看,公路建设比铁路明显,在主产区尤其明显,以2015年为例,公路建设对主产区能量、蛋白质净产出的贡献分别为8.95%、8.60%,而铁路建设只有

1.52%、2.36%。通达便捷的公路网络促进了食物生产潜力的发挥,但道路交通对营养物净产出存在明显区域差异。

### 参考文献:

- [1]徐海亚,朱会义. 基于自然地理分区的1990—2010年中国粮食生产格局变化[J]. 地理学报,2015,70(4):582—590.
- [2]张雄化,钟若愚. 自然资源利用及其效率研究——基于粮食安全生产的视角[J]. 技术经济与管理研究,2014(12):3—7.
- [3]谢文军,张衍鹏,张森,等. 滨海盐渍化土壤理化性质与小麦生产间的关系[J]. 土壤学报,2015,52(2):461—466.
- [4]王秀芬,李茂松. 中国自然灾害与粮食生产脱钩关系分析[J]. 灾害学,2012,27(1):94—97.
- [5]Zhang Y, Gao X, Zhang H. Rationality and sensitivity of resource inputs on outputs in chaohu city [J]. Journal of Resources and Ecology,2013,4(2):179—185.
- [6]Tian X, Sun F F, Zhou Y H. Technical efficiency and its determinants in China's hog production [J]. Journal of Productivity Analysis,2015(6):1057—1068.
- [7]段海啸. 我国农业全要素生产率增长及要素贡献——基于Luenberger指数的实证分析[J]. 山东农业科学,2016,48(3):162—168.
- [8]史常亮,郭焱,朱俊峰. 中国粮食生产中化肥过量施用评价及影响因素研究[J]. 农业现代化研究,2016,37(4):671—679.
- [9]蔡保忠,曾福生. 中国农业基础设施投资的粮食增产效应分析——基于省级面板数据的实证分析[J]. 农业技术经济,2017(7):31—40.
- [10]李谷成,尹朝静,吴清华. 农村基础设施建设与农业全要素生产率[J]. 中南财经政法大学学报,2015(1):141—147.
- [11]李宗璋,李定安. 交通基础设施建设对农业技术效率影响的实证研究[J]. 中国科技论坛,2012(2):127—133.
- [12]World Bank. World development report 2008: agriculture for development[R]. IBRD, Washington DC,2007.
- [13]Angrist J D, Krueger A B. Instrumental variables and the search for identification:from supply and demand to natural experiments[J]. Journal of Economic Perspectives,2001,15(4):69—85.
- [14]张燕,高翔,张洪. 中国农业供养能力的研究[J]. 中国农业大学学报,2013,18(6):224—230.
- [15]Food and Agricultural Organization of the United Nations. Food balance sheets: a handbook [EB/OL]. [2017-05-09]. <http://www.fao.org/DOCREP/003/X9892E/X9892E00.htm>.
- [16]国务院办公厅. 中国食物与营养发展纲要[EB/OL]. (2016-10-11)[2017-05-09]. [http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-10/11/content\\_5117329.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-10/11/content_5117329.htm).
- [17]国家发展和改革委员会. 国家粮食安全中长期规划纲要(2008—2020年)[EB/OL]. (2008-11-13)[2017-05-09]. [http://www.gov.cn/jrzq/2008-11/13/content\\_1148372.htm](http://www.gov.cn/jrzq/2008-11/13/content_1148372.htm).
- [18]中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴1991—2016[M]. 北京:中国统计出版社,1991—2016.
- [19]国家统计局农村社会经济调查司. 中国农村统计年鉴1991—2016[M]. 北京:中国统计出版社,1991—2016.
- [20]中华人民共和国交通运输部. 中国交通运输统计年鉴2010—2015[M]. 北京:人民交通出版社,2010—2015.
- [21]国家发展和改革委员会价格司. 全国农产品成本收益资料汇编2016[M]. 北京:中国统计出版社,2016:86—87.