

The background of the slide is a scenic landscape. In the foreground, there is a lush green grassy field. A river or stream flows through the middle ground, reflecting the light. In the background, there are rolling mountains under a clear sky. The overall color palette is dominated by greens, blues, and yellows.

生态足迹方法 及其在生态系统评估中的应用

中国科学院地理科学与资源研究所

谢高地

报告内容

生态足迹的内涵及本质

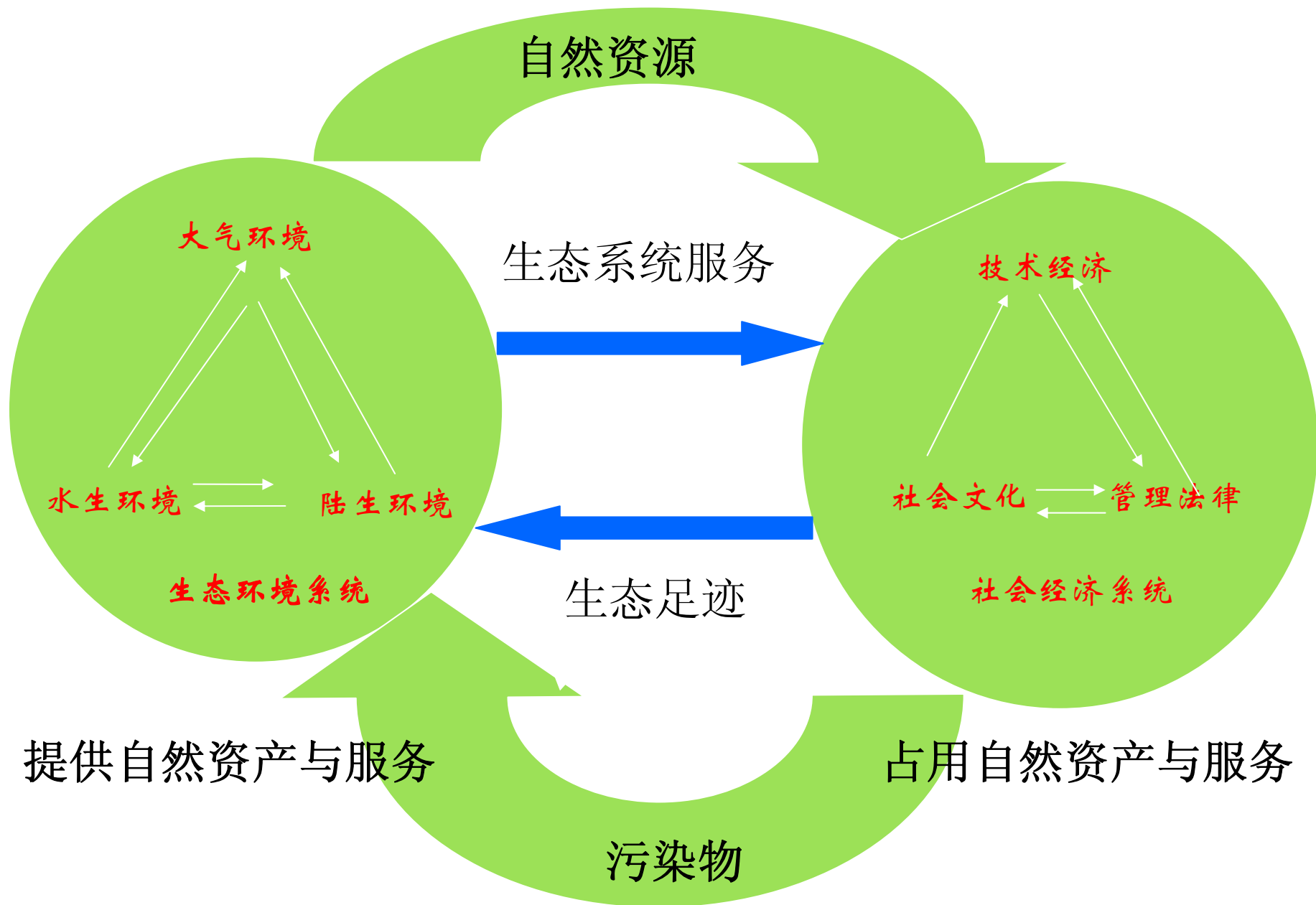
生态足迹核算方法的发展

生态足迹在生态系统评估中的应用

生态足迹方法在中国的实践

生态足迹作为生态系统评估工具的缺陷

生态足迹方法作为生态系统评估工具的能力



一、生态足迹本质与内涵

生产一定人口消费的资源及吸纳产生的废弃物所需要的具有生物生产力的地域空间面积。

(Rees, 2000; Wackernagel, 1995)

生态足迹方法：

- 以生态空间利用作为限制性因子
- 评估人类对生态系统的资源供给、废弃物消纳和基础建设空间支持等三类服务功能的消费与利用程度
- 揭示生态系统产品和服务在不同人群的分配和人类对生产性空间的排他性占用情况。

生态足迹的实质

- 生态承载力的对置表达, 反映和计量对生态系统服务的消费。
- 以生物生产性空间作为可更新能力的代名词, 用之度量进出社会经济系统的物能流, 以此刻画社会与生态系统之间相互作用关系。
- 本质上, 是一种基于社会经济代谢的非货币化的生态系统评估工具

二、生态足迹核算方法的发展

- 生态足迹基本模型
- 动态足迹模型
 - 时间序列足迹模型
 - 基于综合评价的足迹模型
- 投入产出足迹模型
- 组分法足迹模型

生态足迹基本模型

1992年Wackernagel和Rees提出了生态足迹的基本概念，后来引入“产量因子”和“当量因子”将不同类型土地利用加以综合形成了生态足迹基本模型。人均生态足迹和人均生态承载力的计算：

$$ef = \sum_{j=1}^6 (r_j \cdot \sum_i \frac{c_i}{gP_i}) = \sum_{j=1}^6 (r_j \cdot \sum_i \frac{c_i}{lP_i} * YF_i)$$

$$cc = \sum_{j=1} r_j \cdot (\sum_i \frac{ny_i}{gP_i}) = \sum_{j=1} r_j \cdot (\sum_i \frac{ny_i}{lP_i} \cdot YF_i)$$

生态足迹基本模型



基本模型特点：

- 时间尺度：单一时间尺度，即“快拍”式截面
- 所用产量：全球平均产量(产量因子)
- 影响分析：综合影响
- 确定性方面：固定生产与消费条件下的确定性研究
- 反映信息：区域生产与消费的综合信息
- 土地利用：六类土地利用空间
- 综合方法：使用当量因子

生态足迹基本模型的改进

- 生态足迹评估以利用基本模型为主，后来很多研究针对基本模型的缺陷，改进和发展了基本模型。
- 改进的模型不仅承袭了生态足迹概念内涵丰富，度量方法综合的优点，而且不同程度修正了生态足迹在政策实用性、用户有效性、方法可靠性及可测度性等方面的缺陷。

动态性改进1:时间序列模型

多数时间序列足迹研究在探讨产量因子和当量因子对足迹核算的影响方法。目前主要时间序列足迹模型处理产量因子和当量因子的方法包括：

- ① 依据区域真实产量，并不采用当量因子
- ② 采用逐年全球产量和分段当量因子
- ③ 采用逐年全球产量和逐年区域实际产量，不采用当量因子
- ④ 采用最大可持续产量
- ⑤ 采用单位草地植物生产量而非动物产量（计算草地足迹）

动态性改进2: 融合情景模拟的足迹模型

时间序列足迹模型虽具有部分动态性能，但本质上仍属于回顾性评估。

- Senbel等将情景模拟融合到足迹模型之中，增加和提高了模型的预测性能和处理发展方式选择不确定性的能力。
- Bouwman将IMAGE2.2引入到生态足迹基本模型中。IMAGE2.2是荷兰国家公共健康与环境研究所开发的综合评价模型，该模型涵盖了全球气候变化的重要因果链。IMAGE2.2的一些子模型如农业经济模型AEM、土地覆盖LCM、能源模型TIMBER与生态足迹研究关系非常密切。基于IMAGE2.2的足迹模型能更为综合地描述系统的动态变化。

动态足迹模型特点：

- 能反映核算结果对区域生态服务消费水平变化的敏感性
- 能反映区域真实生态空间消费及其位置
- 多情景模拟反映发展方式选择不确定性
- 反映产量因子和当量因子对足迹核算的影响

过程性改进：投入产出足迹模型

- 生态足迹核算要求涵盖所有进入生产和消费过程物品所包含的生态服务。但生态足迹基本模型直接把生态空间利用分配给最终消费，反映的仅仅是直接生态空间占用和区域综合生态影响，无法识别哪些生产和消费部门应对区域综合影响负责。
- 这主要归因于生态足迹基本模型缺乏结构性，没有考虑产业间的相互依赖。

投入产出足迹模型

Bicknell提出使用投入产出分析法，通过里昂惕夫逆矩阵得到产品与其物质投入之间的转换关系，反映各部门生产的生态影响细节。

第一步，计算完全需求系数矩阵。

$$A_{n \times n} = U_{n \times n} \bullet [X^D]_{n \times n}$$

第二步，计算最终使用包含的非能源足迹。

$$i_{k \times n} = L_{k \times n} \bullet [X^D]_{n \times n}^{-1}$$

$$r_{k \times n} = i_{k \times n} \bullet [I - A]_{n \times n}^{-1}$$

$$R_{k \times n} = c_{k \times k} \bullet r_{k \times n}$$

$$FP_{k \times n} = R_{k \times n} \bullet [Y^D]_{n \times n}$$

$$FPU_{k \times 4} = R_{k \times n} \bullet [FTU]_{n \times 4}$$

投入产出足迹模型

第三步，计算能源消费的生态足迹

$$[rR]_{5 \times (n+1)} = T_{5 \times 8} \bullet [r'']_{8 \times (n+1)}$$

$$[rRF'']_{5 \times (n+1)} = E1_{5 \times 5} \bullet ([f^D_{5 \times 5}]^{-1} \bullet [rR]_{5 \times (n+1)})$$

第四步，计算进口贸易和其他来源产品包含的生态空间

$$FIP_{k \times n} = R'_{k \times n} \bullet [Y_i^D]_{n \times n} = [E_{k \times k} \bullet r_{k \times n}] \bullet [Y_i^D]_{n \times n}$$

第五步，分别按生产部门和最终使用部门汇总生产和消费的生态足迹

投入产出足迹模型特点

- 采用倍乘子计算足迹
- 结构性强
- 能反映部门间的足迹流动
- 能揭示生态影响的真实发生位置
- 能揭示某一部门的完全生态消费

组分足迹模型

上述模型均为综合法模型, 为了反映生态影响的详细程度, 组分法以人类的衣食住行为出发点, 核算人口具体行为的生态影响。

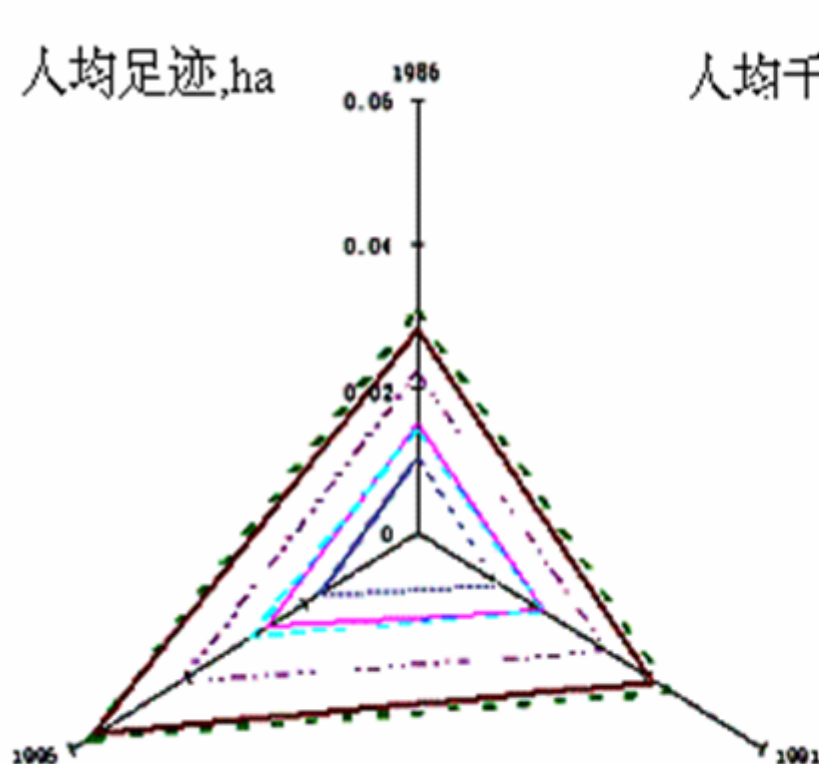
组分法足迹模型

2003年Barrett与Simmons提出系统的组分法模型，该模型分两步核算生态足迹

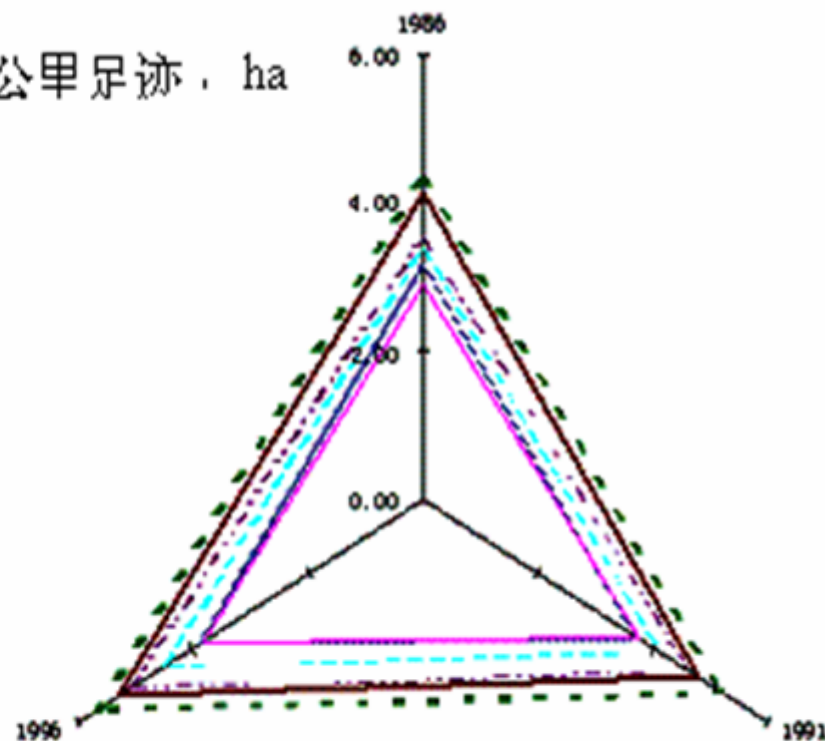
- 第一步：把研究区的生态足迹分解成直接能源消费、原材料、废弃物、食物、私人交通、水、建筑用地7类组分。
- 第二步：采用资源流分析技术收集数据，研究资源在不同部门、人口与环境之间的流动，从而将消费数据转化为组分影响。把研究对象分解成相应组分

组分模型研究案例：交通

人均足迹, ha



人均千公里足迹, ha



..... 巴塞罗那 一环路 二环路 卫星城 卫星城郊区 都市廊道

Muñiz, Galindo (2005)

组分足迹模型特点

- 关注人口衣食住行细节行为
- 采用生命周期技术
- 适用于对国家、省、市、地方、企业、家庭乃至个人的生态环境影响评估

生态足迹模型变化趋势

自1992年提出以来，生态足迹得到了广泛的应用。围绕回答对生态足迹质疑的同时，EF模型得到了迅速发展，主要趋势是：

- 研究的时间尺度：由单一时间尺度向连续时间序列拓展
- 研究采用的生产力指标：由单一年份全球平均产量拓展为多种实际产量
- 影响分析方面：由表达综合影响拓展为反映各部门的细节影响
- 确定性方面：由固定情景研究拓展为多情景模拟的不确定性研究
- 研究对象方面：由空间对象拓展为组分对象，
- 研究方法：由综合法转变为综合法与组分法并存

三、生态足迹在生态系统评估中的应用

- 系统压力与状态评估

- 生态公平性评估

- 区域公平



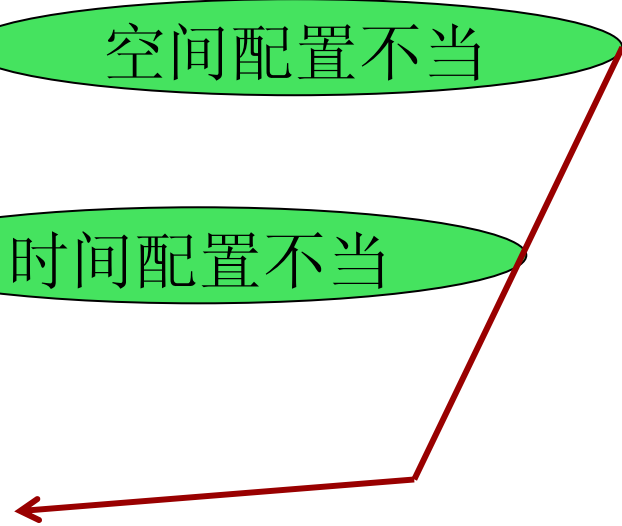
空间配置不当

- 代际公平

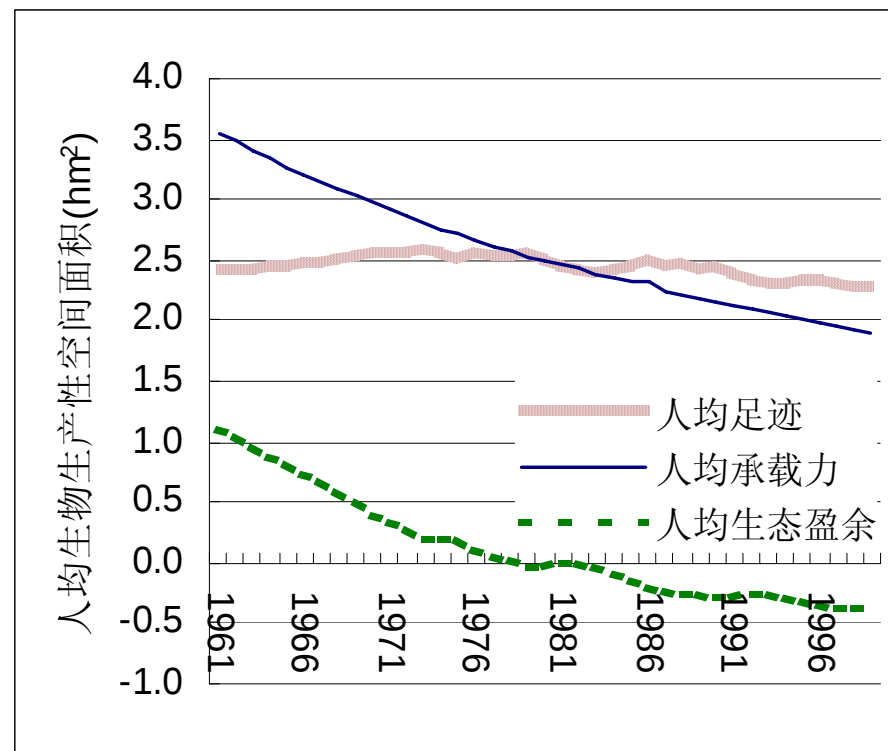
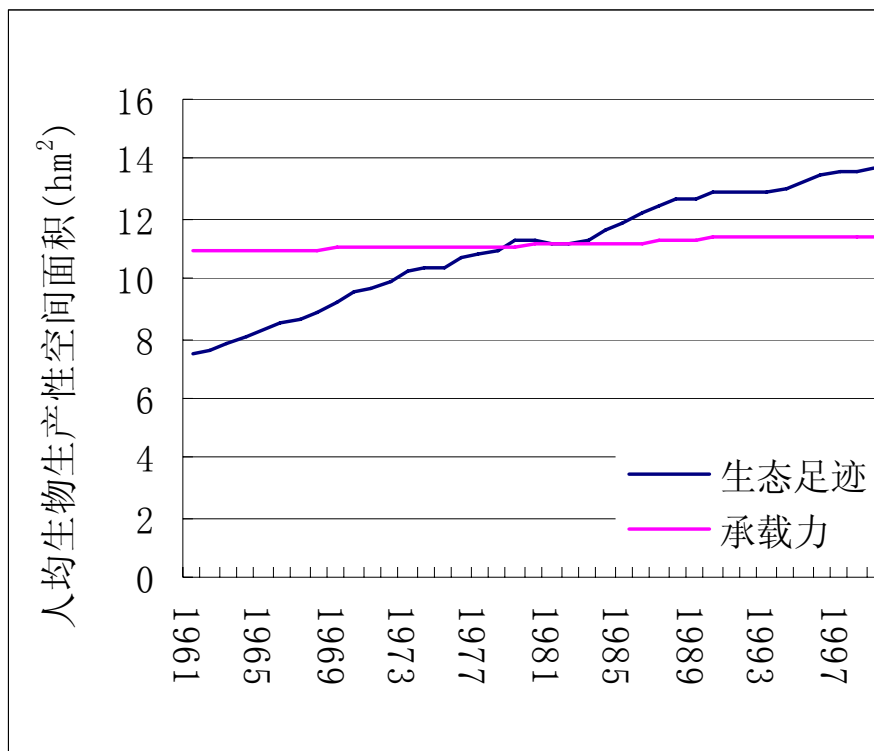


时间配置不当

- 生态补偿决策参考

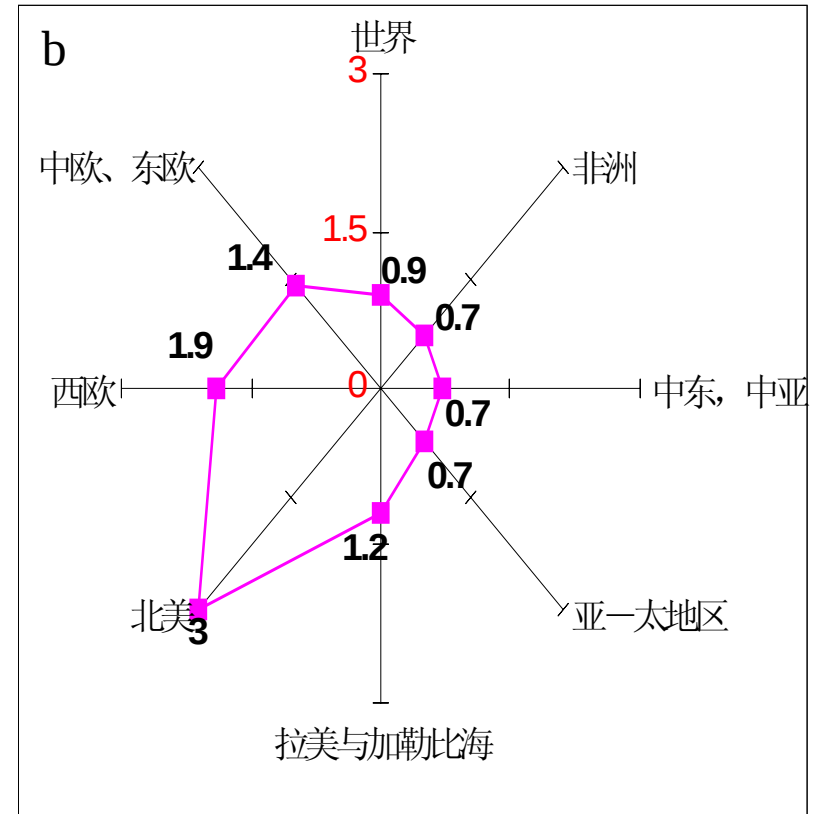
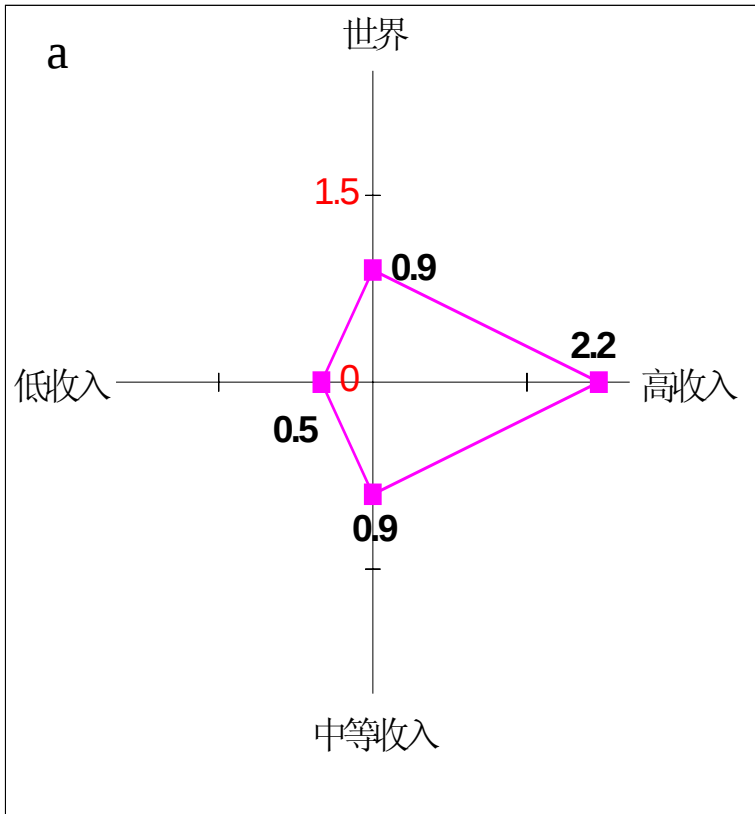


全球生态足迹及承载力变化 (1961—2000)



代际配置不当自1980开始

不同收入水平国家及地区的食物、纤维与木材的足迹



生态占用的区域不公平

生态占用的区域不公平：FFT

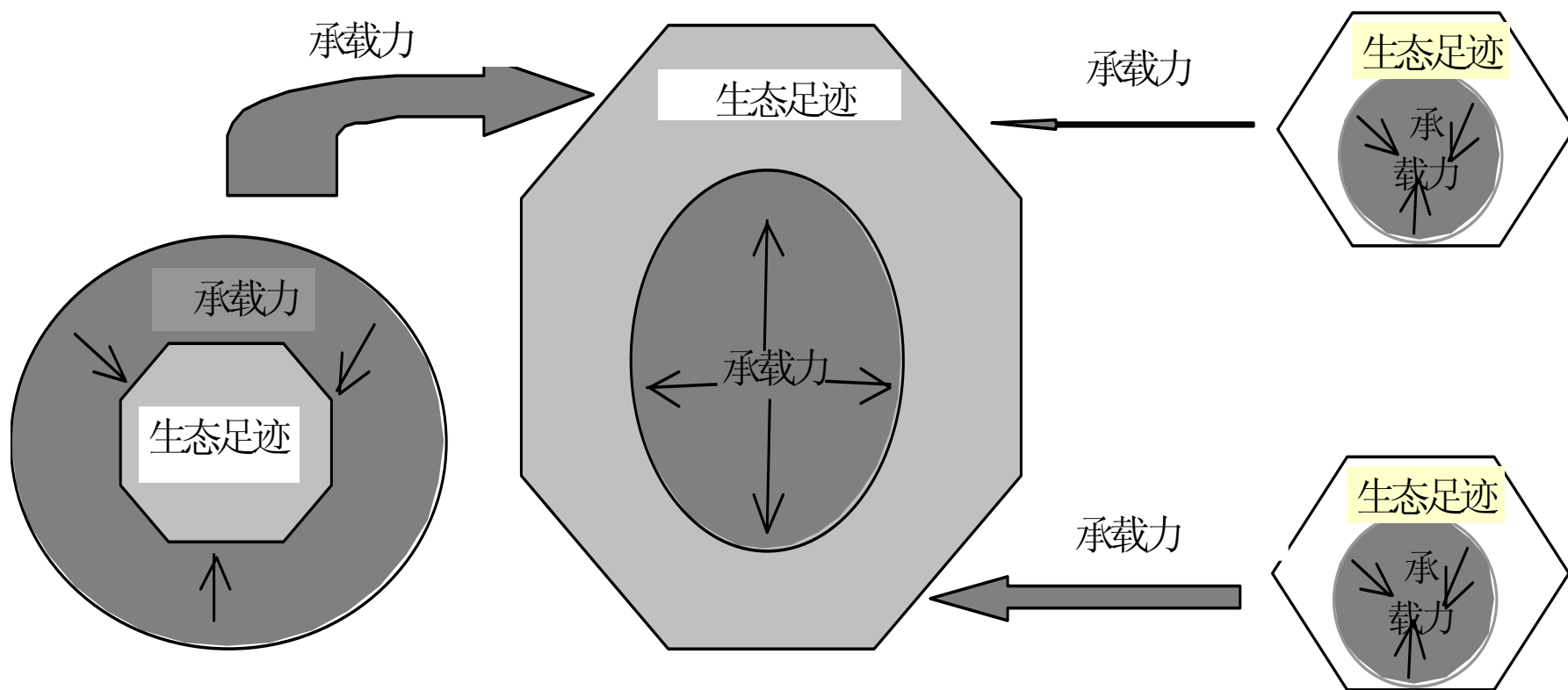
排名位置	国家分布	占世界人口	占世界总FFT足迹
前30位	主要在欧洲	14%	36.9%
后30位	主要在亚洲	29.5%	13%

- FFT：人口消费食物、纤维、木材
- 148国家参与计算（中国：居80位）

Living Planet Report

区域生态足迹与生态服务流示意图

——时间与空间的配置不当



Torras , 2003

生态足迹外债与债务减免：减免额度

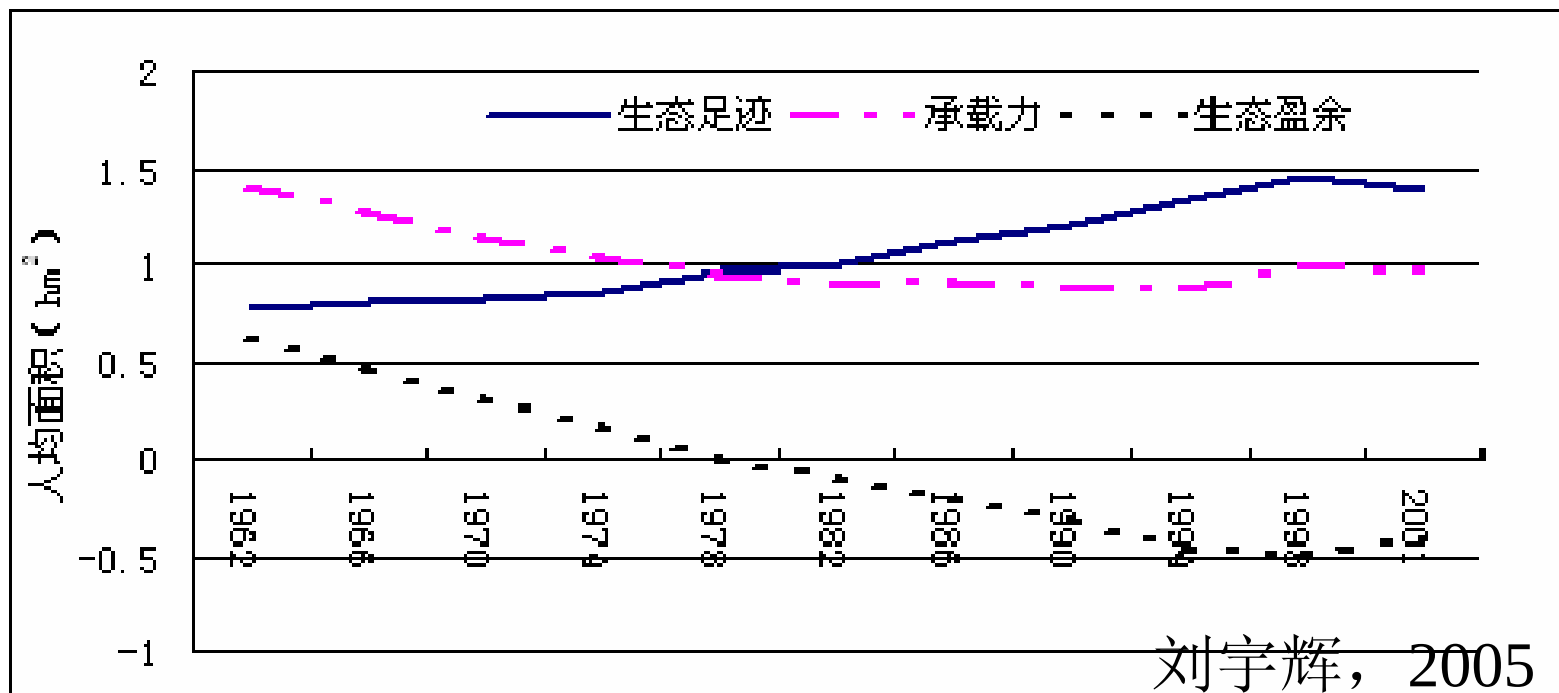
- 5~10%生态赤字是空间配置不当引起的
- 每公顷生产性空间平均生态受益：4400\$
- 全球生态赤字：37.3亿hm² （1996）
- 补偿面积及金额

补偿比例（%生态赤字）	补偿面积	补偿金额
5	1.87亿hm ²	8215亿\$
10	3.73亿hm ²	16400亿\$

4、生态足迹方法在中国的研究实践

- 系统状态评估
- 生态影响结构性评估
- 膳食消费的生态合理性评估

中国生态系统服务供给与消费的时序变化 (1961—2001)



1978年以来：一直处于入不敷出的赤字状态
人均进口足迹不超过 0.05hm^2 (刘建兴, 2005)

生态资本存在时间配置不当，
而国家间的空间不当基本不存在

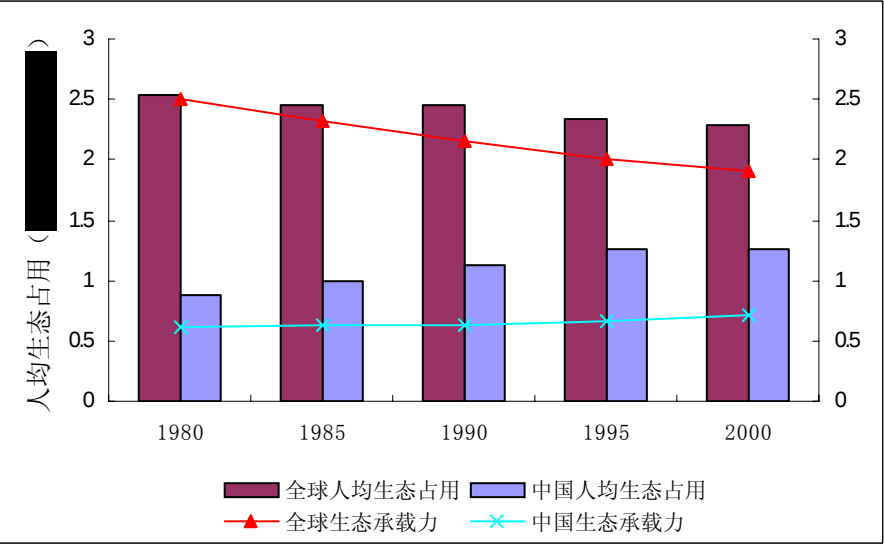
不同年份的中国人均生态足迹 (hm²)

年份	生态足迹	生态承载力	生态赤字
1980	0.885	0.61	0.275
1985	0.990	0.625	0.365
1990	1.133	0.626	0.507
1995	1.263	0.66	0.603
2000	1.258	0.71	0.548

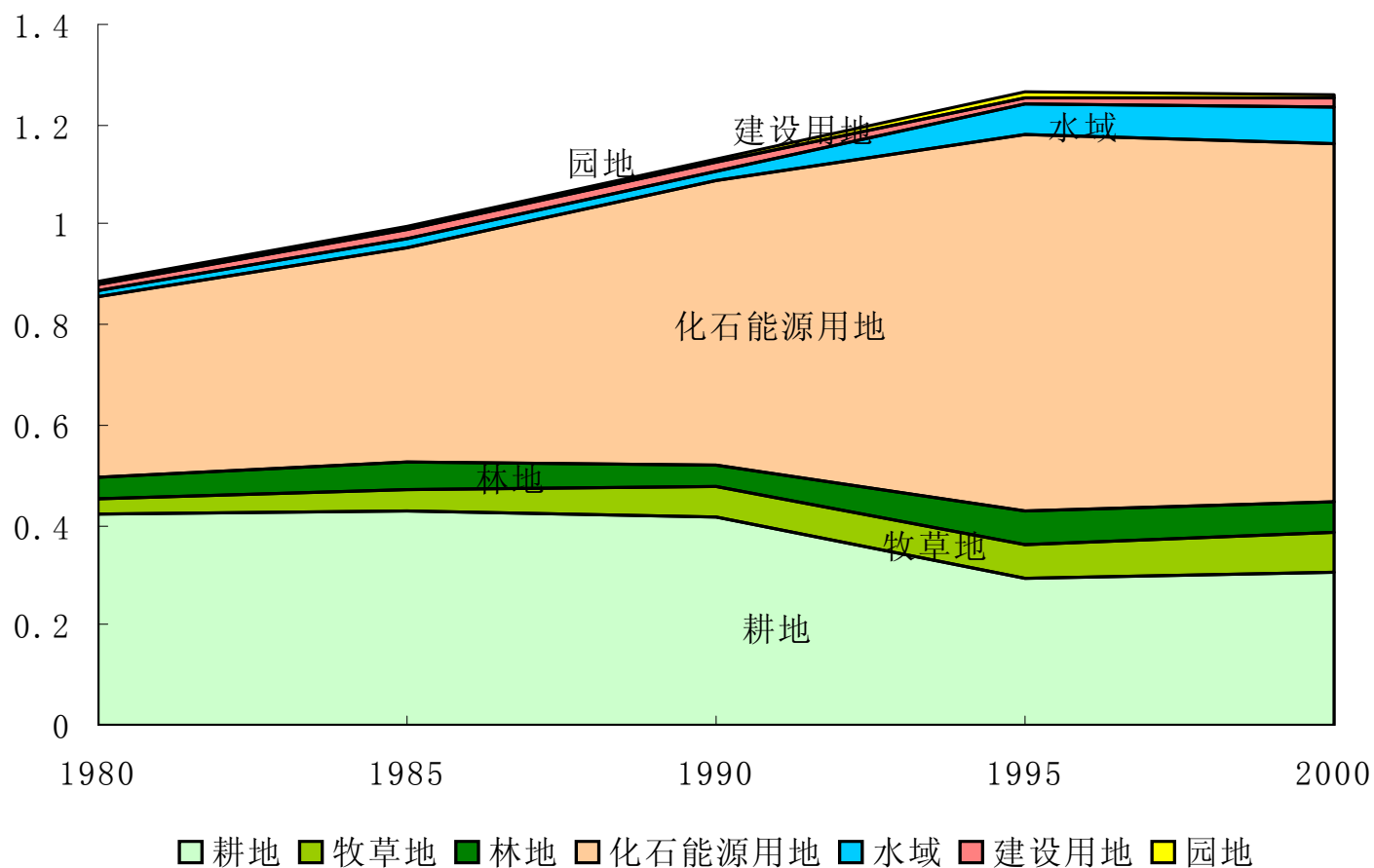
生态赤字增加

我国的人均生态占用过去20年从0.885 hm²增加到了1.258 hm²，呈持续增加态势。人均生态足迹增加了73%。

目前，我国人均生态占用为1.3，相当于世界平均水平的65%，人均生态承载力为0.7，相当于世界平均水平的37%，人均生态赤字为0.5公顷。



生态足迹增加主要是化石能源用地增加



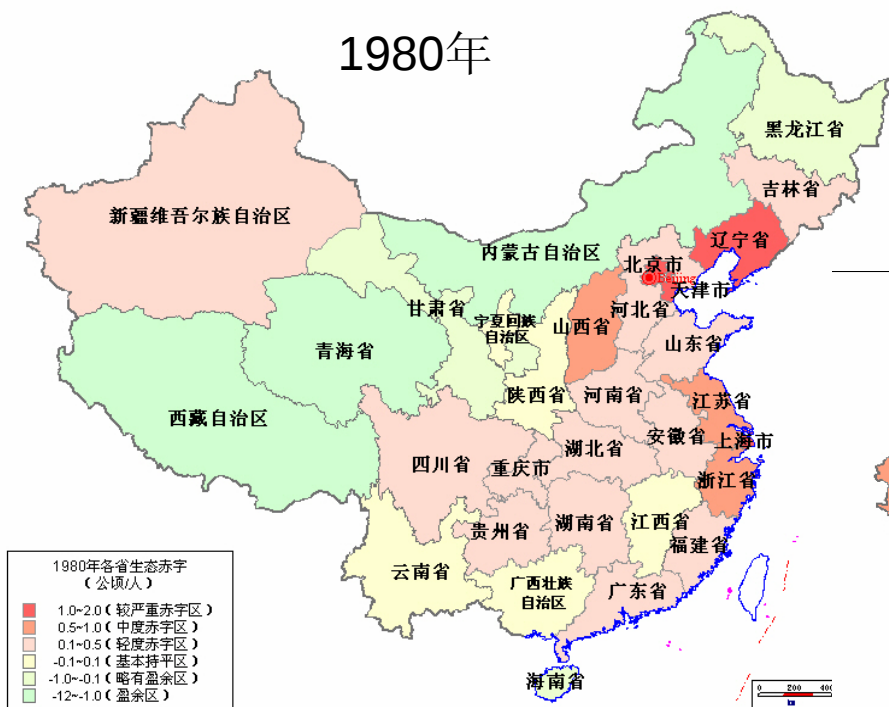
不同年代处于生态赤字区的省（市、自治区）个数

	1980年	1990年	2000年
生态赤字区	19	24	26
严重生态赤字区	0	2	3
较严重生态赤字区	3	2	4
中度生态赤字区	3	8	12
轻度生态赤字区	13	12	7
生态盈余或持平区	12	7	5
生态基本持平区	4	4	2
生态盈余区	8	3	3

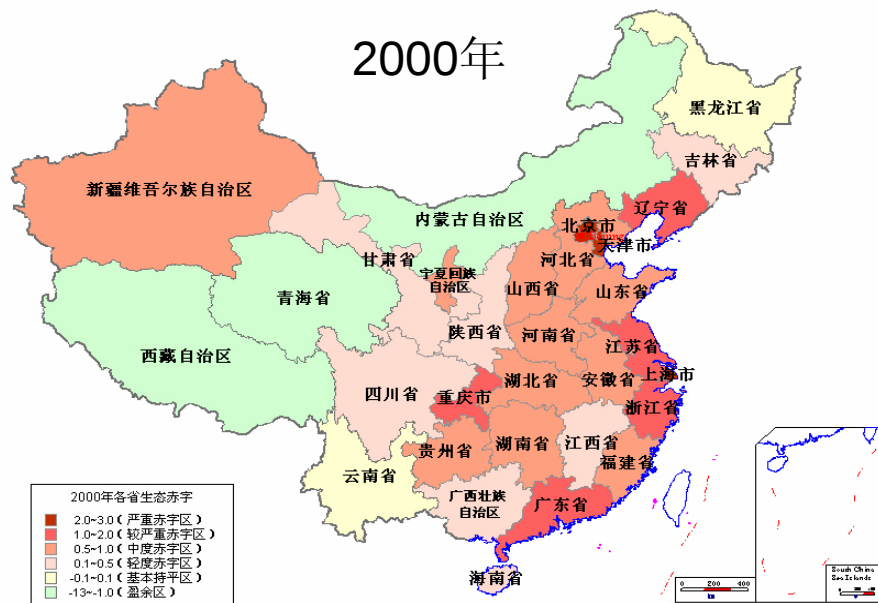
我国的生态赤字区不断扩大，**1980**年，我国有**19**个省处于生态赤字区，**12**个省处于生态盈余区或持平区；**2000**年生态赤字区扩大到了**26**个省。说明我国已长时间处于大范围生态透支状态。

生态赤字扩大的分布图

1980年



2000年



中国生态足迹的空间状态

- 甘肃省/1998 (徐中民,2000)
- 新疆/1999 (陈东景, 2001)
- 四川/2001 (邓踪,2003)
- 广东/2000 (胡新艳,2003)
- 青海/1995 (鲁春霞,2001)
- 西藏/2002 (刘孝宝,2003)
- 甘肃/1992~2002 (岳东霞,2004)
- 天津/1998 (张水龙,2004)
- 广东/1990~2002 (高长波,2005)
- 辽宁/2002 (Wang Qing, 2004)
- 北京/2002 (崔风暴, 2005)
- 西部地区/1999 (张志强,2001)
- 西北地区/1999 (陈东景,2001)
- 黄土高原/1991 (黄青,2003)

除青海、西藏
其他均生态赤字

经济发展
透支生态资本

生态足迹在中国部门的流动（1997）

人均足迹空间（hm²）的生产部门分布

	第一产业	第二产业	第三产业	生产合计
非能源足迹	0.45	0.291	0.072	0.818
能源足迹	0.04	0.430	0.111	0.667
合计	0.49	0.721	0.183	1.485

人均足迹空间（hm²）的消费部门分布

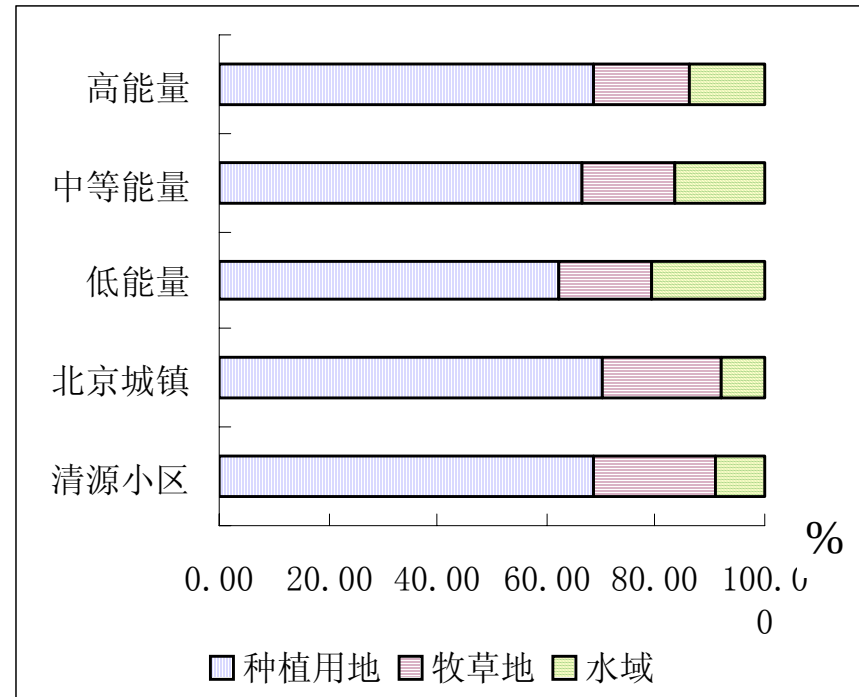
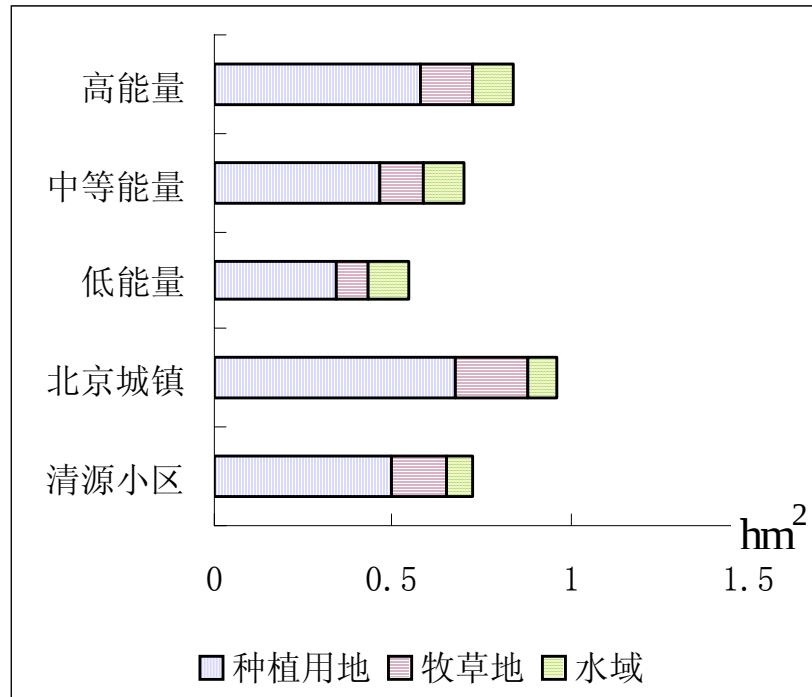
	居民	政府	资本形成	出口	国内消费合计
非能源足迹	0.599	0.031	0.221	0.115	0.787
能源足迹	0.332	0.048	0.267	0.147	0.648
合计	0.892	0.079	0.488	0.262	1.435

承载力 = 真实足迹（0.818） + 未参与IOA的足迹（0.046） = 0.864

生态足迹在中国部门分布的特点

- 足迹净出口国，足迹贸易逆差人均 0.05 ghm^2 。
- 能源用地 “80%”现象：
 - 能源种类：约80%来自煤炭消耗；
 - 生产部门：约80%缘于第二、三产业；
 - 最终使用：约80%缘于居民消费和资本形成。
- 国内最终消费足迹：2/3～居民消费，1/3～资本形成。
- 第三产业人均足迹最小（ 0.183 ghm^2 ），单位占用经济产出最高（ $0.898 \text{ 万元 ghm}^{-2}$ ）。
- 一、二、三产业的土地倍乘子依次为1.2、143.1 和 16.1，即第一产业以直接占用土地为主，第二、三产业以间接占用为主。

膳食消费的生态合理性



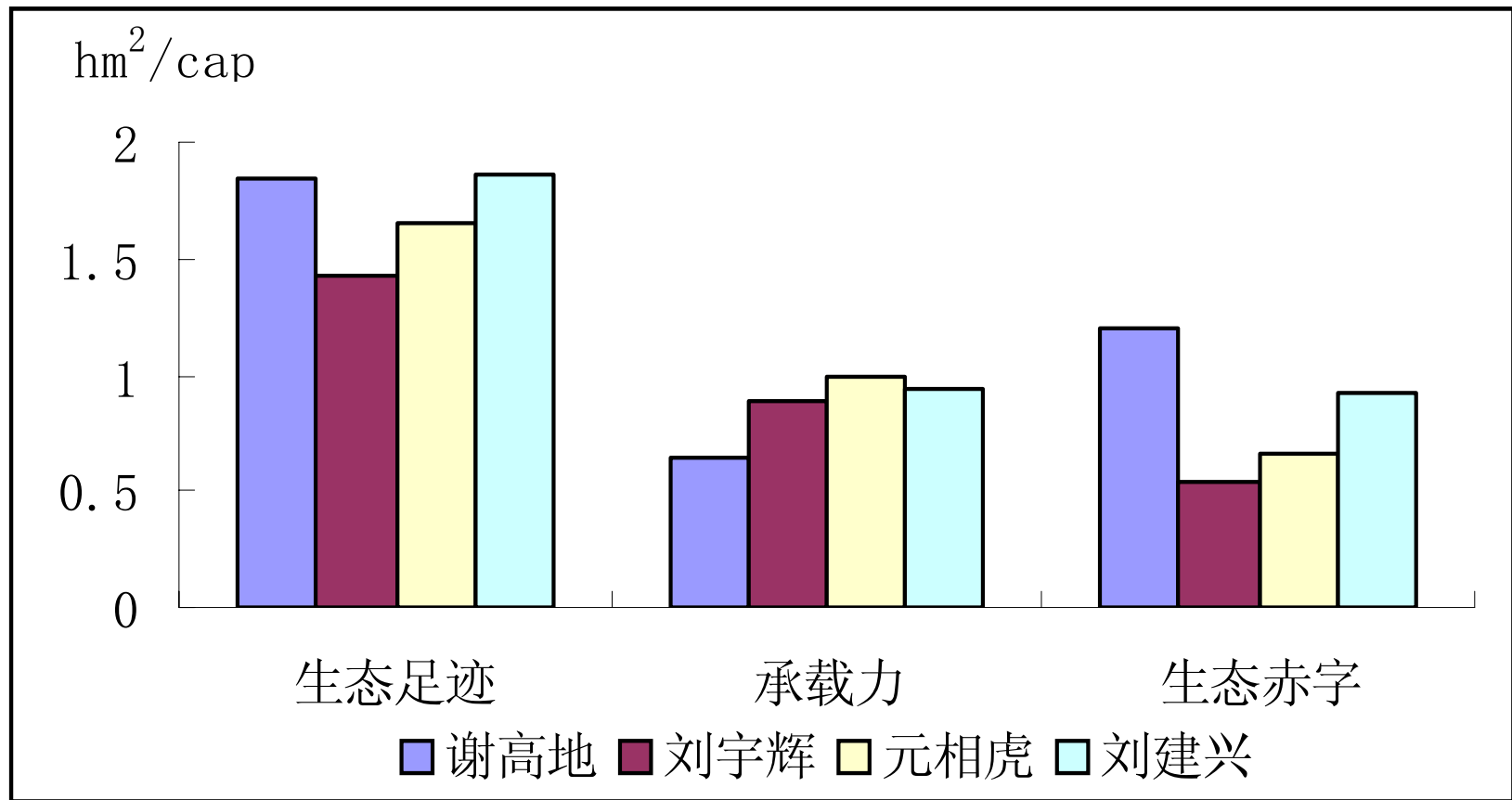
合理膳食足迹（人均）：0.5474~0.8389 hm^2/a ，
种植用地：牧草地：水域=62~69：17~18：14~21（%）

清源小区：总量合理，结构不合理
北京城镇总体：总量不合理，结构不合理

五、生态足迹作为生态系统评估工具的缺陷分析

- **核算完整性：**
 - 污染物考虑不完全
 - 没有考虑海洋和地下资源
 - 排斥不可再生资源与可再生资源之间的替代性
- **结果可比性**
 - 6例新西兰人均足迹：3.3~9.6 hm²
 - 中国（1995）
- **方法标准性不规范**

不同研究给出的 中国人均生态足迹与承载力（1995）



核算方法缺乏标准化的例证 (新西兰研究)

	Bicknell (1998)	Loh (2000)	McDonald (2003)
生产力	国家平均生产力	全球平均生产力	国家平均生产力
等价因子	没有应用	应用	没有应有
能源用地	依据 Wackernagel 推荐的 比能源足迹计算	使用全球平均二氧化碳吸 收因子计算	使用新西兰的二氧化碳吸收因 子 (Hollinger, 1993) 计算
碳吸收能力	忽略海洋的碳吸收能力	海洋吸收 35% 碳排放量	忽略海洋的碳吸收能力
生物用地	没有预留生物多样性用地	拨出 12% 的生产性空间	没有预留生物多样性用地
海域	未包括	包括	未包括
研究尺度	从国家尺度考虑区域的生 态相互依赖性 (总进口)	从国家尺度考虑区域的生 态相互依赖性 (总进口)	从国家组成区域尺度分别阐述 不同区域的相互依赖性
核算方法	投入产出足迹模型	生态足迹基本模型	投入产出足迹模型
人均足迹	3.49 hm ²	9.54 hm ²	3.08 (调整后 8.35) hm ²

McDonald, 2003

六、生态足迹方法作为生态系统评估工具的能力与研究方向

能力

- (1) 生态足迹方法和生态系统服务方法集成, 可以形成生态系统评估的有效工具。
- (2) 可以反映生态服务生产、流动、消费的全过程, 反映生态系统和社会经济系统之间的非对称性互动, 反映生态系统服务的滥用和不充分利用。

六、生态足迹方法作为生态系统评估工具的能力与研究方向

能力

(3) 可以分析其他资源对生态系统服务的替代性, 根据生态系统服务的替代性和生态系统多功能性合理配置生态系统。

(4) 生态系统服务和生态足迹评估必须基于生态观测或生态模型基础之上, 重视生态系统服务生产和消费的实物量流量过程曲线, 充分利用生态网络长期观测数据反映动态性, 利用遥感手段反映空间异质性, 将推动生态系统评估理论和工具的发展。

六、生态足迹方法作为生态系统评估工具的能力与研究方向

研究方向

- 全球研究
 - 不断修正、完善及标准化足迹核算方法
 - 加强对淡水资源足迹、污染物足迹和资源替代的足迹效应的研究工作
- 中国研究
 - 大跨度时间序列的动态过程研究
 - 区域及其部门之间的生态足迹流动性研究
 - 生态足迹及生态承载力的时空配置研究
 - 小尺度的用户针对性研究
 - 方法标准化与本土化应用研究

谢谢

